



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA



Trabajo fin de grado para acceder al título de grado en ingeniería de los recursos mineros

MINERÍA URBANA COMO HERRAMIENTA PARA UNA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS: ASPECTOS METODOLÓGICOS

**URBAN MINING AS A TOOL FOR A CIRCULAR ECONOMY IN WASTE MANAGEMENT:
METHODOLOGICAL ASPECTS**



Director:

Rubén Aldaco García

Autor:

MARCOS GARCÍA ROBA

Torrelavega, febrero 2020

RESUMEN

Este trabajo de investigación de Proyecto Final de Grado está orientado a estudiar la viabilidad de un proyecto de minería urbana para la recuperación de minerales y metales no ferrosos a partir de residuos eléctricos y electrónicos, *e-waste*, como aportación a la economía circular. El marco referencial que sustenta el trabajo se basa en los postulados de la economía circular como filosofía de desarrollo sostenible expresados por Paluš, Parobek, Šulek, Lichý y Šálka (2018), y la manifestación de los principios del modelo económico circular expuestos por Kowszyk y Maher (2019) en sus estudios de caso desarrollados en la Unión Europea, así como los planteamientos sobre las ventajas de la minería urbana en la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE, de Fernández (2013). El trabajo ha sido desarrollado bajo una metodología de investigación documental, que ha implicado la profusa revisión de documentos escritos y audiovisuales (Normas, leyes regulaciones y tratados) sobre el tema en Europa y en España, con un mínimo componente de investigación de campo para conocer los volúmenes de RAEE generados y recogidos por período. Los resultados obtenidos a partir de la información recabada y evaluada permiten asumir la viabilidad de la puesta en marcha de una planta para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE, con impacto positivo en dos áreas, la medioambiental, con la recuperación de metales y minerales potencialmente peligroso evitando su efecto sobre la naturaleza, y la económica, con la obtención de metales y minerales escasos en la naturaleza que pueden ser reutilizados en la industria como materia prima. En síntesis, una actividad que puede ser desarrollada con apego a los postulados de la economía circular.

ABSTRACT

This research project of Final Degree Project is aimed at studying the feasibility of an urban mining project for the recovery of minerals and non-ferrous metals from electrical and electronic waste, e-waste, as a contribution to the circular economy. The referential framework that supports the work is based on the postulates of the circular economy as a philosophy of sustainable development expressed by Paluš, Parobek, Šulek, Lichý and Šálka (2018), and the manifestation of the principles of the circular economic model exposed by Kowszyk and Maher (2019) in his case studies developed in the European Union, as well as the approaches on the advantages of urban mining in the management of waste electrical and electronic equipment, WEEE, Fernández (2013). The work has been developed under a documentary research methodology, which has involved the profuse review of written and audiovisual documents (Standards, laws, regulations and treaties) on the subject in Europe and in Spain, with a minimum field research component to know WEEE volumes generated and collected by period. The results obtained from the information collected and evaluated allow us to assume the viability of the start-up of a plant for the integral management of waste electrical and electronic equipment, WEEE, with a positive impact on two areas, the environmental, with the recovery of potentially dangerous metals and minerals avoiding its effect on nature, and the economic one, with the obtaining of scarce metals and minerals in nature that can be reused in the industry as raw material. In synthesis, an activity that can be developed in accordance with the postulates of the circular economy.

CONTENIDOS

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	8
I.1. Contexto global.	9
I.2. Necesidad de un cambio.	13
I.3. Economía circular como solución.	15
I.4. Marco legal.	19
Capítulo 1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.	23
1.1. Objetivo general.	23
1.2. Objetivos específicos.	23
1.3. Justificación del trabajo.	23
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE.	25
2.1. Residuos sólidos urbanos, RSU.	25
2.2. Minería inversa.	33
2.3. Minería urbana.	35
Capítulo 3. TECNOLOGIA EN LA INCINERACIÓN.	38
3.1. Aspectos básicos de la incineración de residuos urbanos.	38
3.2. Tecnología en la incineración.	43
3.3. Composición de las cenizas de fondo.	46
3.4. Solidificación de las cenizas de fondo.	48
Capítulo 4. LOS METALES EN LOS RSU.	51
4.1. Efectos de la incineración.	52
4.2. Los metales en las cenizas de fondo.	54

Capítulo 5. PROCESADO DE LA CENIZA DE FONDO.	56
5.1. Conminución.	57
5.2. Clasificación.	59
5.3. Separación.	59
5.4. Técnicas de procesado de cenizas de fondo.	66
5.5. Funcionamiento de la planta.	67
 Capítulo 6. METODOLOGIA DEL ESTUDIO. Análisis comparativo de las técnicas de procesamiento y valorización de residuos	 71
 Capítulo 7. APILCACIÓN A CASO PRÁCTICO. (Muestras y análisis).	 73
7.1. Armado de caso.	76
 Capítulo 8. ASPECTOS ECONÓMICOS.	 80
8.1. Estimación de ingresos.	80
8.2. Estimación de costes.	84
 Capítulo 9. CONCLUSIONES.	 86
 Capítulo 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	 88
 Anexos.	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones) incluidas las fracciones recogidas selectivamente.	29
Tabla 3.1. Sustancias presentes en los humos de la combustión.	41
Tabla 7.1. Propiedades físicas de las cenizas de hogar de RSU.	77
Tabla 8.1. Volúmenes posibles de metales recuperables por Ton. de RAEE.	83
Tabla 8.2. Precios de referencia de metales. (Por Ton. y Kg.).	83
Tabla 8.3. Estimación de posibles ingresos por recuperación de metales en una tonelada de RAEE. (En €).	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución porcentual de los Residuos Sólidos Urbanos, RSU, en España.	12
Figura 1.2. Ranking de principales países productores de RREE en el mundo en 2016 (en millones de TM).	13
Figura 1.3. Comparación de modelos de economía lineal y circular.	16
Figura 2.1. Clasificación de RSU por tipo de recogido.	31
Figura 2.2. Esquema economía circular en el ámbito de la minería urbana.	36
Figura 2.3. Producción de residuos electrónicos en el mundo. 2010-2018. (En millones de toneladas).	37
Figura 3.1. Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos, RSU.	43
Figura 3.2. Esquema de funcionamiento de central de incineración de RSU.	48
Figura 5.1. Esquema de máquina trituradora de materiales.	58
Figura 5.2. Separación de metales no férricos por corrientes de Foucault.	62
Figura 5.3. Separador gravimétrico por corrientes verticales.	64
Figura 5.4. Separador de metales en medio denso del tipo tambor.	65
Figura 5.5. Diagrama de flujo de procesamiento de cenizas de fondo.	67
Figura 7.1. Ubicación de plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos RSU, en España.	74
Gráfico 7.2. Alternativa 1 utilizando un proceso preliminar de cribado.	78
Gráfico 7.3. Alternativa 2 sin utilizar el proceso preliminar de cribado.	79
Gráfico 7.4. Alternativa 3 con separación por sensores de inducción y válvulas de soplado.	80
Gráfico 8.1. Procesos de funcionamiento de un centro de gestión de RAEE.	82

Gráfico 8.2. Índice del precio promedio por kilómetro.

85

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I.1. CONTEXTO GLOBAL.

Es cada vez más creciente la preocupación a nivel mundial por el desarrollo de las actividades de los hombres en la sociedad y su impacto sobre el medio ambiente y la salud humana, debido a la creciente generación de residuos. Si bien es cierto que desde la aparición del hombre sobre la tierra sus actuaciones han tenido efectos sobre el equilibrio ecológico, en la era moderna, a raíz del crecimiento poblacional exponencial y el desarrollo ingente de operaciones productivas de orden diverso, se generan diariamente millones de toneladas de desechos de todo tipo, lo que pone en peligro la estabilidad ecológica del planeta, lo que debe conducir a tomar responsablemente y con el concurso de todos una serie de medidas si se quiere conservar la vida en la tierra bajo parámetros equilibrados y armónicos en un sentido general.

Es imposible ignorar la violenta huella que deja la explotación de recursos naturales limitados, por lo que la sociedad no puede desentenderse de los desechos que se generan cuando un bien material ha cumplido su ciclo de vida útil, así como de la explotación de algunos de recursos naturales que obligan en su explotación a afectar los suelos, capa vegetal y tierra, con deterioro importante de su entorno. . La economía se sustenta tanto en el conocimiento como en el uso de recursos y energía, factores que producen residuos, emisiones, vertidos y pasivos ambientales.

El constante y exponencial incremento de la población y su mayor aglomeración en núcleos urbanos tiene consecuencia directa en el aumento en la generación de residuos (Fernández, 2013). A este fenómeno se suma otro factor que agrava la situación, el tipo de desarrollo de una sociedad que avanza gracias a un modelo consumista no sustentable.

La producción global de metales ha experimentado desde los comienzos del siglo XX un incesante aumento hasta los días actuales. Este incremento tiene

como fuentes protagónicas visibles el *boom* de la posguerra y en la década de los años 90 el auge de la economía china y la democratización de las nuevas tecnologías. Ya entrados en el Siglo XXI, Cortés (2012) ha señalado que en el año “(...) 2008 se produjeron en el mundo más de 1,4 miles de millones de toneladas de metales, el doble de la cantidad de finales de 1970 y más de siete veces más (sic) que en 1950” (párr. 7). A este ritmo se han generado más de 40 mil millones de toneladas de metales para diversos usos y fines. La media de uso de metales *per cápita* aumentó desde 77 kilogramos en 1950 a 165 kilogramos en 1975, y a 213 kilogramos en el 2008.

Un artículo de la redacción de BBC News Mundo (2019) da a conocer que la agencia inglesa de riesgos *Verisk Maplecroft* en un informe desarrollado indicó que en el mundo se producen más 2.100 millones de toneladas de desechos anualmente, de la que solo se recicla o reúsa el 16 %, siendo USA el país mayor generador de residuos por persona, tres veces más que la media global, con el 12 %. China e India, naciones que juntas representan un tercio de la población global, generan el 27 % de los desechos, cerca de la cuarta parte. En Europa la nación que genera mayor cantidad de productos de desechos es Holanda.

Indudablemente que en esta era tecnológica se vive en una incesante revolución tecnológica que ha cambiado los modos de vida a partir de la universalización del consumo y del uso de aparatos eléctricos y electrónicos, lo que por demás pareciera hacerse irresponsablemente. A este hecho se le agrega la desconcertante Ley de Moore, que expresa que, “aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un circuito integrado” (Ramírez, p. 293).

Se pueden señalar dentro de los factores causales principales de esta compleja situación la democratización de las nuevas tecnologías y la drástica reducción de la vida útil de los dispositivos electrónicos, lo que deviene en un ingente volumen de residuos provenientes del uso de aparatos eléctricos y electrónicos. Como complemento de esta realidad, además, se coloca un gran peso sobre la industria extractiva de minerales y sobre los recursos limitados de los que se abastece para la fabricación de los productos, algunos de los cuales siendo esenciales para las nuevas tecnologías, empiezan a escasear.

¿Qué se puede hacer para subsanar esta situación? En principio crear conciencia desde todos los espacios de la sociedad para entender que el actual modelo de economía lineal orientado a la generación de residuos no es compatible con el avance de la civilización. Este puede ser el primer paso hacia la adopción del concepto de economía circular.

España no escapa a esta realidad y busca adherirse, mediante el establecimiento de políticas congruentes, a los preceptos de la reducción de residuos y la preservación del medio ambiente. Un estudio de Iriani, Puig y Sastre (2018), muestra la decisión de esta nación por adoptar los criterios, prioridades y resultados determinados en las diferentes Normas establecidas por la unión Europea, dentro de las cuales destacan la Directiva Marco de Residuos del 2008 y la Directiva de Vertido de 1999, normativas orientadas a una correcta gestión de los desechos generados en ámbitos como el hogar, comercio e industria.

La generación de residuos en este país ha tenido un crecimiento vertiginoso y para el año 2016 la nación ibérica "(...) enviaba 5,6 millones de toneladas de residuos municipales biodegradables a vertederos, mientras que la tasa de reciclaje se mantiene alrededor del 30 % desde el 2010." (Iriani, Puig y Sastre, 2018, p. 5), aún por debajo de las metas promedio mínimas establecidas en la Directiva de Vertido.

La naturaleza de los desechos es amplia y heterogénea, siendo el mayor porcentaje correspondiente a los residuos orgánicos, casi 40 %, seguido de envases comerciales, 19 %, y restos de plástico y metal, 13 %. En este segmento se encuentran los residuos de dispositivos electrónicos que generan cerca del 70 % de contaminación por metales pesados y altamente tóxicos para la salud y excesivamente dañinos para el medio ambiente como: Plomo, Cadmio, Selenio, Mercurio, Cobre y Arsénico, entre otros. (Calderón, Alcívar y Acebo, s. f.).



Figura 1.1 Distribución porcentual de los Residuos Sólidos Urbanos, RSU, en España. **Fuente:** Ecoembes, 2018.

En este punto, la aplicación de minería urbana puede ser altamente beneficiosa al permitir la obtención de una importante cantidad de minerales mediante reciclaje, con un alto beneficio económico, con la ganancia adicional de minimizar el impacto contaminante de tales materiales en el medio ambiente.

I.2. NECESIDAD DE UN CAMBIO.

Los países, asumiendo el problema de la contaminación por la ingente cantidad de desechos que se generan diariamente, deben ser responsable en asumir un cambio de sistema productivo y de consumo que guíe a la sociedad hacia un estadio de calidad de vida sostenible en el tiempo. La disyuntiva entre niveles de desarrollo y disponibilidad de recursos se ve seriamente comprometida en los días actuales y un tema fundamental a resolver es el de diseño de modelos productivos con base o sustento en la idea de sostenibilidad.

Este contexto permite asentar un tema de primer orden en el manejo de los modelos sostenibles a partir del reciclaje o reúso, en esta era donde priman los

productos electrónicos y eléctricos y cuando se asume el agotamiento de ciertos metales estratégicos para la producción en este sector. Se plantea todo un gran reto en el cambio hacia el uso de modelos integrados de gestión con base en la recolección y reciclaje de desechos, lo que posibilita, por una parte, el alivio en la extracción y el agotamiento de estos recursos, y por otra, la disminución de la carga de residuos que llega a los vertederos con su alto impacto contaminante.

Son sostenidamente crecientes los volúmenes de residuos electrónicos en el mundo. Un estudio conjunto de la Universidad de las Naciones Unidas y la Asociación de Empresas de Tecnología GSMA (citado por Palma, Reyes, Vásquez, Lira y González) señaló que en el 2014 la cantidad de residuos electrónicos, “e-waste”, superó las 40.000 kilotoneladas, estando Estados Unidos, China y Japón a la cabeza en este rubro. En el Gráfico 1 se puede apreciar el ranking de los países productores de “e-waste” en el año 2016.

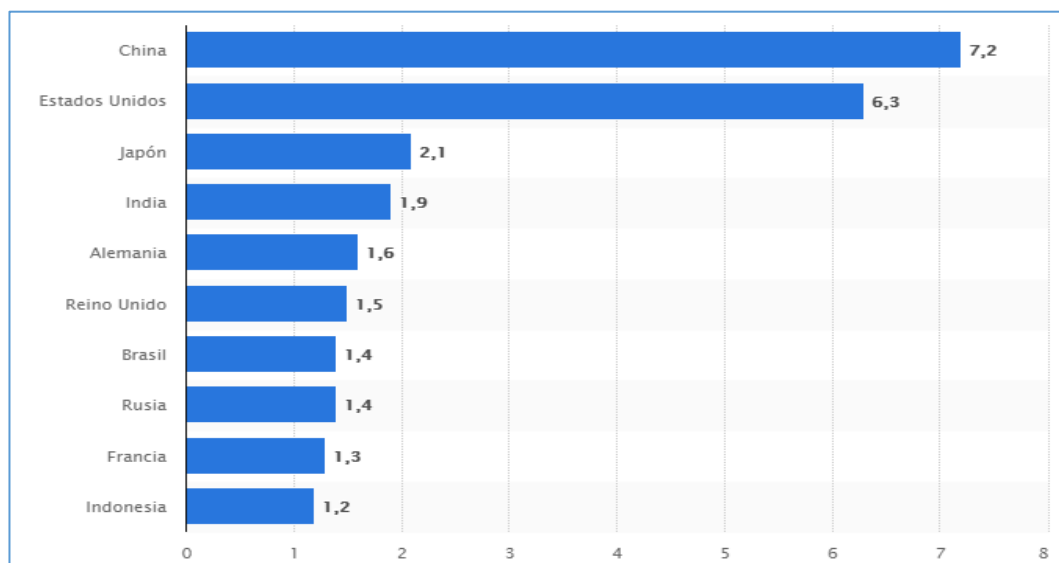


Figura 1.2. Ranking de principales países productores de RREE en el mundo en 2016 (en millones de TM). **Fuente:** Fernández, 2018.

Es allí donde tiene perfecta cabida la aplicación del reciclaje de metales o minería urbana, como también se le denomina. Según Delauney y Montero (2013) se pueden obtener entre 300 y 350 gramos por tonelada de metales provenientes de los residuos de circuitos de computadoras y teléfonos celulares. Otro tipo de residuos no metálicos, que no sean incinerados para la recuperación de los

metales, pueden ser separados y reciclados en otros procesos y utilizados en otras industrias.

Esta posible solución a la minería inversa puede y crea valor al recuperar una parte importante de minerales y polímeros con posibilidad de utilizarse posteriormente como insumos de nuevos aparatos electrónicos, reduciendo de esta forma el impacto que como materiales de desecho causan sobre el medio ambiente. Esta recuperación tiene un efecto económico positivo evidente, tanto por los materiales que se pueden recuperar y reutilizar como en la contribución en la generación de empleo. En síntesis, el concepto de “minería inversa” parece ser sencillo, como lo es usar los recuperados desechos y residuos que actualmente se entierran o queman, como materia prima para la fabricación de nuevos productos.

I.3. ECONOMÍA CIRCULAR COMO SOLUCIÓN.

Se estima, según la *Ellen Macarthur Foundation* (s. f.), que el modelo económico actual que opera bajo las premisas de “tomar, hacer, tirar” a partir de la disposición de grandes volúmenes de materias primas y energía a bajo coste, aunado al uso de medios muy baratos para deshacerse de lo que ya no tiene interés en el circuito de producción y consumo, no es funcional. En ese sentido Cerdá y Khalilova (2016) acotan que éste ha derivado en un modelo económico de crecimiento sin precedentes, pero que parece estar alcanzando sus límites. De hecho, Steffen *et al* (2015), entre otros muchos autores, señalan que no parece ser éste un modelo sostenible.

Aparece entonces la concepción de economía circular como un modelo alternativo viable. Ahora bien, ¿Qué es la economía circular y qué la que la convierte en un hecho económico sustentable? Prieto, Jaca y Ormazabal (2017) proponen una definición conceptual sobre el tema como un paradigma, idea modelo o base, capaz de “generar prosperidad económica, proteger el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando así el desarrollo sostenible” (p. 85).

Se centra en un principio de ejecución de estrategias diversas de sostenibilidad en toda la cadena de producción y el uso de productos y servicios, con efectos de mejoras reales en la economía y la sociedad, con sustento en las bases del desarrollo sostenible, que a entender de Paluš, Parobek, Šulek, Lichý y Šálka (2018) es el uso de los medios para satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de las necesidades para las generaciones del futuro, un uso responsable de los recursos pensando en las sociedades posteriores.

Para la *Ellen Macarthur Foundation* (s. f.) una economía circular es aquella que trata de que los insumos, ya sean productos o materias, mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento, planteando como modelo económico una ruptura en la actual relación entre desarrollo y consumo de recursos finitos.

A decir de Kowszyk y Maher (2019) el modelo económico que propone se orienta a la reducción del impacto negativo de los sistemas de producción sobre el medio ambiente, mediante la consecución de objetivos como el aumento de la vida útil de los productos, la producción de bienes con ciclos de vida más duraderos y la concentración en el servicio más que en el producto. Los colaboradores de *Ellen Macarthur Foundation* (s. f.) entienden que la economía circular descansa y se apoya fundamentalmente sobre tres principios básicos. a saber:

Principio 1: la preservación y el mejoramiento del capital natural, controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables. Que se traduce en desmaterializar la utilidad, ofreciendo una utilidad virtual cuando es óptima. Ante la necesidad de recursos el sistema circular los selecciona de forma sensata, eligiendo tecnologías y procesos que utilizan recursos renovables o de mayor rendimiento de ser posible. También mejora el capital natural al alentar los flujos de nutrientes dentro del sistema y generando las condiciones para la regeneración de los activos, por ejemplo el suelo.

Economía Lineal



Economía Circular



Figura 1.3. Comparación de modelos de economía lineal y circular. **Fuente:** Kowszyk y Maher, 2019.

Principio 2: Optimización en el rendimiento de los recursos, distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos. Esto implica la ejecución de procesos para refabricar, reacondicionar y reciclar desechos con la intención de mantener los componentes técnicos y materias primas circulando y contribuyendo a la economía. En los sistemas circulares se utilizan bucles internos más estrechos cuando resulta posible, preservando así más energía implícita y otros valores.

Estos sistemas maximizan el número de ciclos consecutivos y/o el tiempo empleado en cada ciclo, aumentando así la vida útil de los productos y optimizando la reutilización. Además promueven que los nutrientes biológicos vuelvan a entrar en la biosfera de forma segura para que la descomposición resulte en materias más valiosas para un nuevo ciclo. En el ciclo biológico los productos se diseñan deliberadamente para ser consumidos o metabolizados por la economía y de esta manera regenerar el valor del nuevo recurso.

Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos. Este apartado incluye la reducción de daños en sistemas y espacios como la alimentación, la movilidad, los centros de acogida, la educación, la sanidad y el ocio, además de la gestión de factores externos como el uso del suelo y la contaminación acústica, del aire y del agua o el vertido de sustancias tóxicas.

En este contexto y considerando las premisas de base que sustentan el modelo de economía circular, puede entenderse que la minería urbana se convierta en un concepto importante para el establecimiento armonioso de relaciones ganar-ganar en la sostenibilidad de los recursos y la protección del medio ambiente, con el compromiso de una gestión basada en el reciclaje (Li, 2015). Las buenas prácticas recogidas en los principios del modelo de economía circular están orientadas a:

- Preservar y mejorar el capital natural: control de las reservas limitadas y equilibrio en los flujos de recursos.
- Optimizar el uso de los recursos: distribución de productos, componentes y materiales con la máxima utilidad en términos de sus ciclos técnicos y biológicos.
- Promover la eficacia del sistema: detección y supresión de las externalidades negativas. (Kowszyk y Maher, 2019, p. 8).

I.4. MARCO LEGAL

Son muchas las iniciativas adelantadas en el mundo, en el ámbito europeo y en España para darle un soporte legal que sea de común cumplimiento al desarrollo de la economía circular, la gestión de residuos sólidos urbanos y a la

minería urbana. Como caso concreto que bien lo ejemplifica se tiene el documento “Cerrar el círculo: un plan europeo de acción para la economía circular”, presentado por la Comisión Europea en el 2015, en el que se plantea que la economía circular:

(...) impulsará la competitividad de la UE al proteger a las empresas contra la escasez de recursos y la volatilidad de los precios, y contribuir a crear nuevas oportunidades empresariales, así como maneras innovadoras y más eficientes de producir y consumir. Creará puestos de trabajo a escala local adecuados a todos los niveles de capacidades, así como oportunidades para la integración y la cohesión social. Al mismo tiempo, ahorrará energía y contribuirá a evitar los daños irreversibles causados en lo relativo al clima y la biodiversidad, y a la contaminación del aire, el suelo y el agua, a causa de la utilización de los recursos a un ritmo que supera la capacidad de la Tierra para renovarlos. (Comisión Europea, 2015, p. 2).

El desarrollo del Paquete de Economía Circular, PEC, va más allá, tanto en tiempo como en objetivos, de lo que está actualmente establecido en las actuales directivas europeas, ya que se extiende hasta el año 2030 con objetivos más estrictos en materia de reciclado y eliminación de residuos y actuaciones concretas en estos campos y en materia de prevención.

En el campo de la producción, el PEC apoyará el mejor diseño de los productos bajo la Directiva de Ecodiseño que hace que los productos sean más duraderos y más fáciles de reparar y reutilizar, y se propondrán reglas para conseguir un desmontado, un reciclado y una reutilización más fácil y segura de aparatos electrónicos. Contempla igualmente la aclaratoria de las reglas sobre subproductos y el estado de fin de la condición de residuo para aquellos productos o materiales secundarios derivados de los residuos, lo que ayudará a apoyar el desarrollo de una simbiosis industrial en la cual ciertos materiales inservibles para una empresa podrán ser aprovechados por otra.

En lo relacionado con la gestión de residuos eléctricos y electrónicos en Europa se le da cumplimiento a la Directiva 2006/66/EC emanada del Parlamento Europeo y del Consejo (2006), en la cual se estableció como objetivo un índice de recogida

y reciclado de 45 % mínimo desde el 2016, además de fijar procesos de monitoreo, etiquetado y reporte de todas las acciones en ese sentido.

Sobre lo referido a la gestión de residuos de las industrias extractivas y de actividades de minería fue establecida por el Parlamento Europeo y el Consejo (2006) la Directiva 2006/21/CE con la finalidad de establecer los requisitos mínimos para reducir en lo posible cualquier efecto negativo de las actividades económicas señaladas sobre el medio ambiente y la salud humana.

España, ceñida a la responsabilidad de cumplimiento de los acuerdos generados en el seno de los organismos representativos de los países de la Unión Europea, adapta las Normativas, Directivas y Reglamentos a su ordenamiento jurídico de forma cabal. Es así como en el año 2015, en la nación ibérica el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015) aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos, PEMAR, 2016-2022, plan centrado en la consecución de los objetivos de reciclado como parte de la economía circular y la gestión de residuos sólidos urbanos, RSU, establecidos como obligaciones por la UE, y que está vigente en este país.

Asimismo en España se adaptó la Directiva europea para el manejo de los residuos electrónicos y eléctricos, en función de contar con una herramienta legal a lo interno para el manejo de esta problemática ambiental, mediante el Real Decreto 106/2008, emanado del Ministerio de la Presidencia (2008), en el cual se establecen las bases para la gestión de este tipo de residuos, lo que involucra recogida y tratamiento por parte de productores y usuarios.

De la misma manera el Ministerio de la Presidencia (2009) realizó los ajustes internos pertinentes de la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo para adaptar tal lineamiento al ordenamiento jurídico español en lo referente al tratamiento ambiental de la industria extractiva y de minería en el territorio, lo que se hizo a través del Real Decreto 975/2009 de junio de 2009, documento en el cual se establecen los criterios para el funcionamiento medioambiental responsable de este sector productivo. Tal documento contempla:

contenido, clasificación, periodicidad de revisiones, instalaciones para tratamiento de residuos mineros y obligaciones del explotador.

En el Real Decreto 975/2009 se plantea el aprovechamiento de los residuos de la actividad minera y se fomenta en él la recuperación de tales desechos a través de actividades de reciclaje, reutilización o revaloración, siempre y cuando sean congruentes los procesos con el respeto por el medio ambiente, en concordancia con las propuestas impulsadas dentro de la Comunidad Europea, que implican el uso de tecnologías capaces de aprovechar los residuos mineros mediante la recuperación de los metales presentes en tales desechos.

Este decreto sufrió una modificación en el año 2012, siendo reemplazado por el Real Decreto 777/2012 en lo concerniente a la clasificación y caracterización de los residuos generados por la industria extractiva, aportando listas con los tipos de materiales que pueden producir residuos en la minería y de residuos considerados inertes, además de fijar los contenidos que han de caracterizar un residuo o desecho producido por la industria de la minería.

CAPITULO 1.

OBJETIVOS Y

JUSTIFICACIÓN

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Estudiar la viabilidad de un proyecto de minería urbana para la recuperación de minerales y metales no ferrosos a partir de residuos eléctricos y electrónicos, *e-waste*, como aportación a la economía circular.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1.2.1. Valorar la importancia de la economía circular como modelo económico con respeto por el medio ambiente, teniendo la recuperación y reciclaje de residuos sólidos urbanos, RSU, como uno de sus pilares fundamentales.

1.2.2. Revisar las tecnologías y técnicas empleadas en los procesos de minería urbana para la recuperación de minerales y metales y realizar una comparación de ventajas y desventajas de su aplicación.

1.2.3. Evaluar un caso práctico de recuperación de minerales y metales provenientes de residuos eléctricos mediante procesos de minería urbana.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.

El desarrollo de este Trabajo Final de Grado nace a raíz de la preocupación que es cada vez más creciente en el mundo sobre los efectos devastadores de la contaminación en el medio ambiente y sobre la responsabilidad de legarle a las generaciones futuras un mundo más limpio, más amable, más vivible.

El contexto global señala que la población crece de forma exponencial, las tecnologías cambian a un ritmo vertiginoso, la producción industrial de bienes y servicios va en aumento de forma sostenida, y los índices de desarrollo y bienestar humano parecen elevarse sistemáticamente, lo que incide en las tasas de crecimiento en la producción de residuos, tanto domésticos como industriales, con un posterior impacto muy negativo sobre el medio ambiente. De hecho un informe

elaborado para el Banco Mundial (referenciado por Gómez, 2018), proyecta niveles de aumento de hasta 49 % en términos de producción global de residuos sólidos urbanos, especialmente en la zona de Asia Oriental y el Pacífico, zona que registra la cuarta parte de la población mundial.

Los avances tecnológicos, como ya ha sido señalado, hacen posible la obsolescencia de los aparatos, máquinas, equipos y herramientas con mayor rapidez, con ciclos de vida más cortos que obligan a su reposición y desecho, pasando a formar parte del volumen de residuos sólidos urbanos contaminantes.

En algunos países se han tomado iniciativas para valorizar estos residuos y darles un tratamiento diferenciado que los convierta en fuentes de recursos económicamente provechosos como materia prima para la elaboración de otros productos nuevos, además de evitar que pasen a formar parte de los agentes vectores de contaminación. Se identifican de esta manera dos tendencias: una en procura de recursos naturales y materias primas de limitación creciente, y otra de generación de residuos con valor de reaprovechamiento.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL

ARTE

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. RESIDUOS URBANOS, RSU.

¿Qué se entiende por residuo? La legislación imperante en España en materia ambiental depende de la noción de “residuo” existente, por lo que es menester definir su campo de aplicación. A ese efecto se toma la definición de residuo presentada por Parlamento Europeo y el Consejo (2008) en la Directiva 2008/98/CE, en la cual se establece en el artículo 2. Apartado 1, que residuo es “Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”. Se amplía en esta Directiva la definición para los diferentes tipos de residuos (peligrosos, no peligrosos, municipales, de construcción y demolición, alimenticios, biodegradables, etc.) a considerar.

Las legislaciones tanto como han ido depurando la terminología, también han ido introduciendo nuevas conceptualizaciones como “subproducto” y “fin de condición de residuo”. De esta manera algunas sustancias desaparecen de la clasificación de residuos y ahora reclasifican como subproductos. La Directiva anteriormente reseñada expone claramente en el Artículo 5 la definición de subproducto, como:

“(…) una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, (...) únicamente si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) es seguro que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente;
- b) la sustancia u objeto puede utilizarse directamente sin tener que someterse a una transformación ulterior distinta de la práctica industrial normal;
- c) la sustancia u objeto se produce como parte integrante de un proceso de producción; y
- d) el uso ulterior es legal, es decir la sustancia u objeto cumple todos los requisitos pertinentes para la aplicación específica relativos a los productos y a la protección del medio ambiente y de la salud, y no producirá impactos generales adversos para el medio ambiente o la salud humana.”

Y en cuanto a la determinación del “fin de condición de residuo”, el Artículo 6 de la Directiva 2008/98/CE señala de forma expresa que se dará cuando los Estados Miembros puedan garantizar a través de medidas concretas:

(...) que los residuos que hayan sido objeto de reciclado u otra operación de valorización han dejado de ser residuos si cumplen los requisitos siguientes:

- a) la sustancia u objeto se debe usar para finalidades específicas;
- b) existe un mercado o una demanda para dicha sustancia u objeto;
- c) la sustancia u objeto satisface los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y cumple la legislación existente y las normas aplicables a los productos; y
- d) el uso de la sustancia u objeto no generará impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud.

Es dable acotar que en las distintas Directivas sobre la materia medio ambiental aparece el concepto de residuo, pero no de forma explícita el de Residuo Sólido Urbano, RSU. Es solo en la más reciente, Directiva (UE) 2018/851 del parlamento Europeo y el Consejo (2018) que modifica la Directiva 2008/98/CE, se definen detalladamente en el Artículo 3, apartado a 2 *ter.* a y b, haciendo referencia a los residuos municipales, como:

a) los residuos mezclados y los residuos recogidos de forma separada de origen doméstico, incluidos papel y cartón, vidrio, metales, plásticos, biorresiduos, madera, textiles, envases, **residuos de aparatos eléctricos y electrónicos**, residuos de pilas y acumuladores, y residuos voluminosos, incluidos los colchones y los muebles,

b) los residuos mezclados y los residuos recogidos de forma separada procedentes de otras fuentes, cuando esos residuos sean similares en naturaleza y composición a los residuos de origen doméstico;

En el mismo Artículo 3. Apartado 2, *ter.* b de la Directiva 2018/851 se establecen las excepciones de estos residuos sólidos urbanos, señalándose como aquellos residuos:

(...) procedentes de la producción, la agricultura, la silvicultura, la pesca, las fosas sépticas y la red de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales, incluidos los lodos de depuradora,

los vehículos al final de su vida útil ni los residuos de construcción y demolición. (Parlamento Europeo y el Consejo, Directiva

Queda en evidencia que aunque el concepto de Residuos Sólidos Urbanos, RSU, empíricamente se asume en el entendimiento de la población común, ha sido lento el avance para darle una caracterización legal. Y es absolutamente necesario establecer definiciones claras al respecto para garantizar el eficaz funcionamiento del sistema y el cumplimiento de las metas establecidas (Langa, 2018).

2.1.1. Tipos de residuos sólidos urbanos, RSU

La Comisión Europea (2014), a través de la la Decisión de la Comisión del 18 de diciembre de 2014, presentó una clasificación actualizada de los residuos sólidos urbanos, RSU, tipificada bajo el nombre de “Residuos municipales (Residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente”, cada tipo de RSU con un código específico, en el capítulo 20 de este documento. En la tabla a continuación se reseña la clasificación de los RSU y en el Gráfico 1 se presenta tal clasificación de acuerdo con el tipo de recogida.

Tabla 2.1. Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones) incluidas las fracciones recogidas selectivamente. **Fuente:** Comisión Europea, 2014.

20 01	Fracciones recogidas selectivamente
20 01 01	Papel y cartón
20 01 02	Vidrio
20 01 08	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes
20 01 10	Ropa
20 01 11	Materias textiles
20 01 13	Disolventes
20 01 14	Ácidos
20 01 15	Álcalis
20 01 17	Productos fotoquímicos
20 01 19	Plaguicidas
20 01 21	Tubos fluorescentes y otros residuos con mercurio
20 01 23	Equipos desechados con clorofluorocarburos
20 01 25	Aceites y grasas comestibles
20 01 26	Aceites y grasas comestibles distintos
20 01 27	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen sustancias peligrosas
20 01 28	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen sustancias peligrosas distintos
20 01 29	Detergentes que contienen sustancias peligrosas
20 01 30	Detergentes que contienen sustancias peligrosas distintos.
20 01 31	Medicamentos citotóxicos y citostáticos
20 01 32	Medicamentos citotóxicos y citostáticos distintos
20 01 33	Baterías y acumuladores
20 01 34	Baterías y acumuladores distintos
20 01 35	Equipos eléctricos y electrónicos desechados
20 01 36	Equipos eléctricos y electrónicos desechados distintos
20 01 37	Madera que contiene sustancias peligrosas
20 01 38	Madera que contiene sustancias peligrosas distintas
20 01 39	Plásticos
20 01 40	Metales
20 01 41	Residuos del deshollinado de chimeneas
20 01 99	Otras fracciones no especificadas en la categoría

Continuación: Tabla 2.1. Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones) incluidas las fracciones recogidas selectivamente. **Fuente:** Comisión Europea, 2014.

20 02	Residuos de parques y jardines
20 02 01	Residuos biodegradables
20 02 02	Tierra y piedras
20 02 03	Otros residuos no biodegradables
20 03	Otros residuos municipales
20 03 01	Mezclas de residuos municipales
20 03 02	Residuos de mercados
20 03 03	Residuos de limpieza viaria
20 03 04	Lodos de fosas sépticas
20 03 06	Residuos de limpieza de alcantarillas
20 03 07	Residuos voluminosos
20 03 99	Residuos municipales no especificados en otra categoría

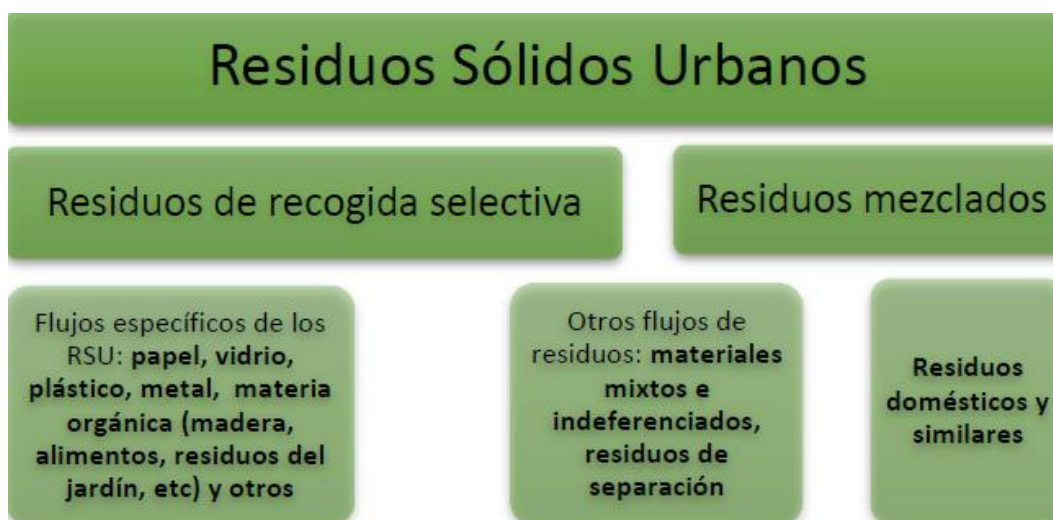


Figura 2.1. Clasificación de RSU por tipo de recogida. **Fuente:** Saveyn, Eder, Ramsay, Thonier, Warren y Hestin, 2016.

2.1.2. Gestión de residuos sólidos urbanos, RSU

El manejo de los residuos sólidos urbanos, RSU, representa un problema sumamente delicado, debido, entre otras cosas, al incremento sostenido en la generación de desechos por parte de los ciudadanos, que de no atacarse con estrategias de gestión adecuadas puede producir un impacto muy negativo en la salud de la población y en el medio ambiente donde habitan.

Para las catedráticas Sáez y Urdaneta (2014), los residuos sólidos municipales o urbanos, materiales de diversa índole que la gente desecha porque ya no les encuentra uso adecuado, cubren un conjunto diferenciado de etapas, a saber: generación, almacenamiento, recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final. El planteamiento de estas expertas es que una gestión sostenible comprende "(...) todas las actividades funcionales u operativas relacionadas con la manipulación de los residuos sólidos desde el lugar donde son generados hasta la disposición final de los mismos" (p. 124) de manera eficiente para optimizar los resultados.

Para concretar una gestión óptima, estos procesos señalados en el párrafo anterior deben ser acompañados por estrategias complementarias que involucren la participación de todos los actores que conforman el sistema de generación y gestión de residuos. A conocimiento de Cruz y Ojeda (2013) estas prácticas son importantes, pero sobre todo:

(...) deben ir acompañadas de concientización a los ciudadanos y servicios otorgados por las instituciones gubernamentales para fomentar la reducción y el reciclaje; por lo que es necesario promover el consumo responsable por parte de la población para disminuir la tasa de generación de residuos sólidos, pero sobre todo generar una política de estado para el fomento de la educación y la cultura ambiental, (...) (p. 2)

Por supuesto que para que la gestión sea exitosa requiere de la dirección responsable y comprometida de las autoridades gubernamentales y debe iniciarse a partir de una caracterización adecuada para poder entender a cabalidad las dimensiones de la producción, los materiales que componen los residuos, el estilo de vida de las familias, el manejo y la disposición final convenientes, de acuerdo con las características particulares de los desechos y el impacto que tienen en el medio ambiente configurado.

Es mucho lo que aún queda por hacer en materia de manejo de desechos sólidos urbanos para alcanzar un estado de gestión satisfactorio, en parte porque la población no termina de asumir los riesgos ambientales asociados al manejo de los residuos. Es necesario reforzar a través de campañas en todos los ámbitos educacionales posibles, la concienciación sobre la importancia de establecer "(...) estrategias que rindan beneficios de las interrelaciones y las sinergias potenciales entre los diferentes actores, así como de la implementación de opciones técnicas disponibles y de los vínculos con otros sectores" (Cruz y Ojeda, 2013, p.2). Sólo con el conocimiento y el concurso de todos los actores será posible alcanzar los resultados apetecidos en relación con la gestión de los RSU.

2.1.3. Residuos sólidos eléctricos y electrónicos, e-waste

Este tipo de residuos contempla todo el material de desecho que tiene como fuente principal el auge del consumo de productos de la industria tecnológica.

También conocidos como *e-waste*, en la nomenclatura en español se denominan residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE. Los aparatos eléctricos y electrónicos, de tecnología más sofisticada y de vida útil más corta, son utilizados en todos los ámbitos de la vida cotidiana (industrial, comercial, educativo, doméstico, personal, etc.), pues su uso representa una ventaja competitiva marcado un nivel paritario con los grados de avance del desarrollo tecnológico, pero a su vez se convierte al final del ciclo de uso en un problema grave por el impacto ambiental que puede llegar a generar su disposición final.

Hidalgo (2010) identifica dentro de los principales aparatos de tipo RAEE que con el tiempo se convierten en residuos peligrosos: tarjetas electrónicas de control industrial, herramientas eléctricas, lámparas fluorescentes, computadoras de escritorio y portátiles, monitores, impresoras, escáneres, videocámaras, equipos de audio, televisores, aparatos de DVD, juguetes electrónicos, teléfonos fijos y móviles y electrodomésticos en general.

Los componentes de los aparatos antes especificados a menudo tienen un potencial de alto riesgo para la salud de las personas y la sanidad del medio ambiente y los ecosistemas en general (suelos, animales y plantas). Algunas sustancias altamente tóxicas presentes en estos aparatos, son: arsénico, cadmio, bario, berilio, retardantes de bromo, cromo, plomo, mercurio, cloruros de polivinilo y ésteres de ftalato. El riesgo que supone los residuos eléctricos y electrónicos para la vida se derivan de estas sustancias que pueden ser liberadas a la naturaleza en el momento de la recuperación o el reciclaje de los desechos que los contienen, como lo atestiguan un conjunto de estudios científicos realizados al respecto.

El manejo y la disposición final no adecuado de este tipo de residuos se posiciona en conflicto con algunos artículos establecidos por la Organización de

Naciones Unidas, ONU, en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de 1966 y el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos de 1976, pactos que forman parte de los derechos contenidos en la Declaración Universal de los Derechos Humanos, en lo referente a los derechos a la vida, a la salud, al acceso al agua y los alimentos de calidad y a la información.

La peligrosidad de este tipo de residuos impone por parte de los gobiernos el establecimiento de regulaciones y mecanismos de control en pro de cumplir con los postulados establecidos en los diversos pactos en materia de gestión de estos desechos y minimizar el impacto que pueda tener sobre la población. En España se les ha dado cumplimiento a tales prerrogativas a través del Real Decreto 106/2008, en el que se han establecido los principios para la gestión de residuos pertenecientes a esta clase.

2.2. MINERÍA INVERSA.

La minería inversa, como su nombre lo indica, describe el proceso contrario a la minería normal en la cual se aplican procesos para extraer los metales y minerales de la naturaleza, en función de aplicarlos como materias primas en la fabricación de diversos productos. La minería inversa devuelve esos minerales como parte de productos desechados por cumplimiento de su ciclo de vida útil con un violento impacto sobre el medio ambiente.

Fernández (2013) explica la minería inversa con acciones que se inician al lanzar productos eléctricos y electrónicos, muchos de sus componentes son de contenido metálico o mineral, al cubo de la basura, los cuales luego son recogidos y enterrados en un vertedero o relleno o incinerados en plantas de residuos industriales, retornando de esta forma al suelo altos contenidos de metales como cobre, estaño, aluminio, hierro, plata y oro, entre otros, “petróleo industrializado” como lo denomina el autor, o a la atmósfera como contaminante humo. Es importante destacar el posible agotamiento de la capacidad extractiva y probable escasez de algunos de estos metales, debido, en parte, al incremento de la

demanda generado por el vertiginoso incremento de las tecnologías y la sobre explotación de estos recursos limitados.

Tal hecho origina una situación de daños permanentes en el ambiente y los diferentes ecosistemas y en los individuos, ampliamente demostrados en múltiples estudios científicos de casos realizados. Por ejemplo, un estudio desarrollado en China por Xu *et al* (2012) señaló que como consecuencia del deficiente manejo del reciclaje de residuos electrónicos en la población de Guiyu, los riesgos de mortalidad conseguidos eran cuatro veces más altos que en Xiamen, tomada como población de control del estudio.

De la misma manera Chang y Hong (2013) estudiaron los efectos de la incineración descontrolada de residuos electrónicos y la lixiviación de ácidos en varios sitios del mismo país asiático determinó como resultado el incremento de la exposición de la población a *dibenzo-p-dioxinas* y *dibenzofuranos* por las vías de ingesta alimentaria, contacto dérmico, inhalación e ingesta de tierra y polvo. Otros estudios han comprobado el aumento de niveles de plomo en la sangre de niños chinos expuestos al reciclaje de residuos electrónicos bajo prácticas inadecuadas.

El especialista en temas de gestión ambiental Fernández (2013) explica que la práctica de minería inversa en rellenos no aptos para la contención de lixiviados o la realización de quema de residuos electrónicos, producen no sólo la pérdida de recursos valiosos, que ya es una situación preocupante, sino que, más importante aún, se dispersan en los entornos naturales (suelo, agua, aire) contaminantes altamente riesgosos como los metales tóxicos pesados mercurio, cadmio y bromo.

Estos materiales contaminantes percolan o se infiltran en el subsuelo y llegan hasta las fuentes de agua afectando su calidad de aptas para consumo. Asimismo, el humo ocasionado por los procesos de incineración puede migrar en el aire y llegar hasta cultivos y animales que sirven de alimento a la población, perjudicando su sanidad, y posteriormente acumulándose en los tejidos de las personas que los consumen y generando enfermedades de diverso nivel y riesgo, tal como ha quedado asentado en los estudios reseñados anteriormente.

2.3. MINERÍA URBANA.

La minería urbana viene a ser una práctica económica que sirve de apoyo o sustento al desarrollo de la economía circular, con una función extractiva que trata de poner freno o menguar los efectos de la minería inversa y ayudar a paliar la disminución de los recursos obtenidos de la actividad minera para su transformación en materias primas principales en la fabricación de múltiples productos, recuperando una fracción de los metales y minerales descartados en los residuos sólidos. De esta forma, también brinda apoyo en la conservación de los limitados recursos medioambientales.

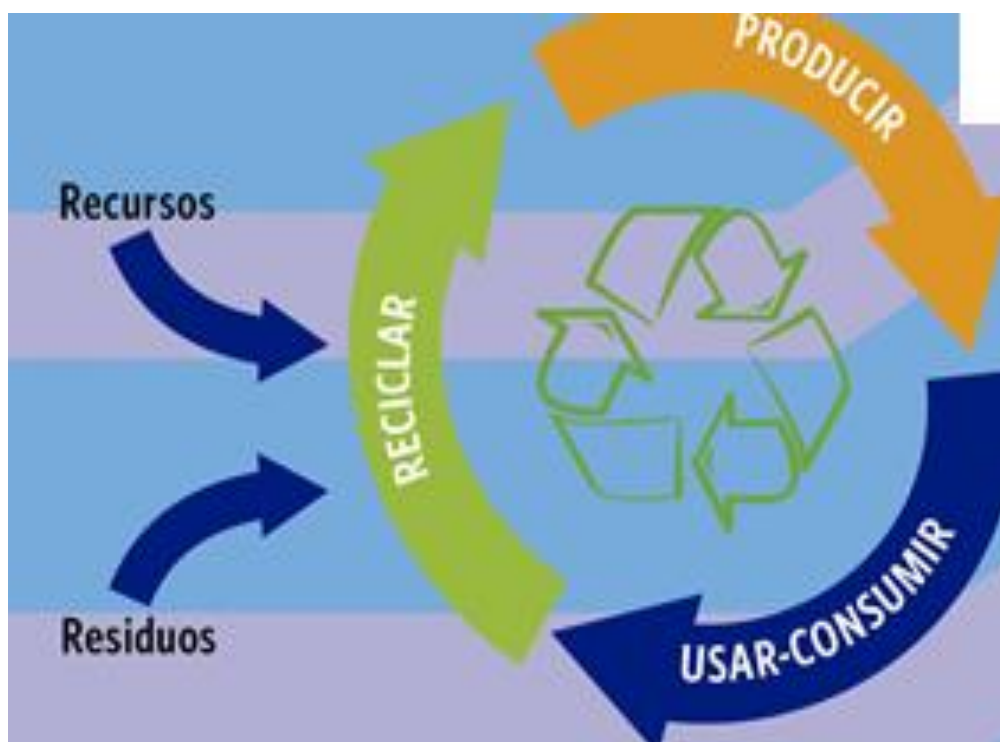


Figura 2.2. Esquema de economía circular en el ámbito de la minería urbana

Fuente: Chirolde, 2019.

En el portal Juventud Técnica, Chirolde (2019) aporta una definición de minería urbana bastante ajustada al que hacer de esta actividad al presentarla como “la recuperación, recirculación y reutilización de recursos, residuos y subproductos a partir de materiales finitos” (párr. 15). Se sustenta en los criterios de producir, usar

y reciclar recursos y subproductos, cerrando el ciclo productivo, en contraposición a los dictados de la economía actual basada en producir, usar y desechar.

El crecimiento de la basura electrónica en el mundo ha tenido un crecimiento altamente preocupante, pasando de 33,8 millones de toneladas en el 2010 a 49,8 millones de toneladas en el 2018, casi 50 % en un lapso de 9 años, como se puede apreciar en el Gráfico XX, volúmenes que seguirán en aumento debido al vertiginoso avance de las tecnologías.

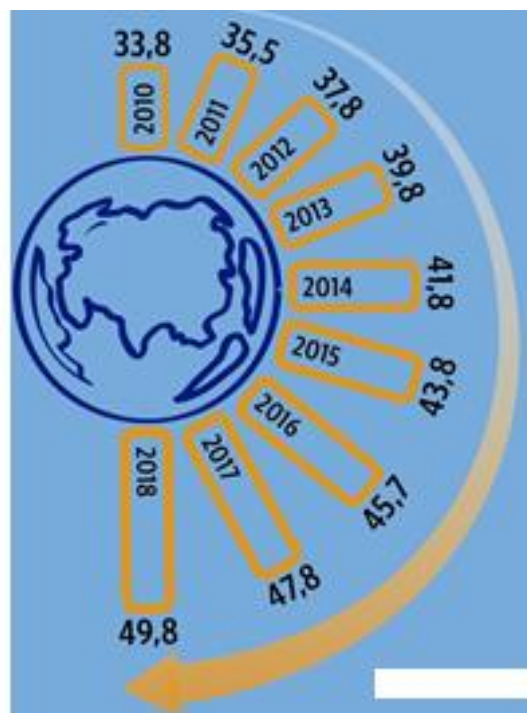


Gráfico 2.3. Producción de residuos electrónicos en el mundo. 2010-2018.
(En millones de toneladas). **Fuente:** Chiralde, 2019.

Se sabe que las computadoras y teléfonos tienen componentes de oro, por sus propiedades conductoras, plata, platino, cobre hierro y aluminio. Según cifras reportadas por el Diario El País y The Global E-waste monitor 2017 (referenciados por Chiralde, 2019), por cada tonelada de teléfonos móviles se pueden obtener hasta 400 gramos de oro y 700 gramos de plata en promedio, amén de otros

materiales, en contra de hasta 5 gramos de oro y 4,2 gramos de plata por cada tonelada de material de roca con estos metales. Pero además el coste de obtención de los materiales por vía de reciclaje es 5 veces menor que por la acción de actividades mineras.

La minería urbana ofrece soluciones en relación con los problemas derivados de la escasez de materias primas metálicas y minerales, y del auge de los precios de las mismas, facilitando el avance hacia una economía circular que permita recuperar estos materiales, además de la recuperación de otros materiales como plástico y vidrio, para volverlos a utilizar en la fabricación de nuevos productos, con mejores costes de producción y además dando apoyo a la preservación del medio ambiente al extraer parte de los productos contaminantes en la disposición final en vertederos y rellenos sanitarios.

CAPÍTULO 3.

TECNOLOGIA EN

LA INCINERACIÓN

CAPÍTULO 3. TECNOLOGÍA EN LA INCINERACIÓN

3.1. ASPECTOS BÁSICOS DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

De acuerdo con la definición del documento BREF elaborado por el Ministerio de medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011), documento que se ajusta a los lineamientos de la Comisión Europea, la incineración de residuos, *Waste Incineration (WI)*, se entiende como la combustión u oxidación química y rápida, exceso de oxígeno (comburente), de materiales inflamables que poseen básicamente hidrógeno (H), carbono (C) y, en algunas oportunidades, dependiendo del tipo de materiales, azufre (S).

Se aprecia que en los procesos de incineración es fundamental la combustión. Brizuela y Romano (2003), definen la combustión como una “(...) reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia (...) se tiene la formación de una llama (...) masa gaseosa incandescente que emite luz y calor” (p. 7). El aire está compuesto por 20.99 % de O₂, 78.03 % de N₂, 0.94 % de Ar, 0.03% de CO₂ y 0.01% de H₂ y el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. Los demás elementos pasarán a los humos. Los residuos de la combustión son cenizas, gases, partículas tóxicas (algunas con efectos cancerígenos), además de calor, que puede utilizarse para generar energía eléctrica.

3.1.2. Tipos de combustión

Los expertos Brizuela y Romano (2003) señalan que existen diferentes tipos de combustión, que dependen de un conjunto de características específicas, a saber:

- **Combustión completa.** La característica principal es que en el combustible las sustancias combustibles presentes se queman hasta lograr la mayor oxidación

posible, y ya no aparecen en el humo, pudiéndose conseguir N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 como productos de la combustión.

- **Combustión incompleta.** En el combustible las sustancias combustibles no alcanzan, al quemarse, una máxima oxidación y en los gases de combustión se pueden conseguir compuestos denominados inquemados, tales como: hidrógeno, partículas de carbono, monóxido de carbono, etc.

- **Combustión teórica o estequiométrica.** Realizada con la cantidad de O_2 teóricamente necesaria, con oxidación total y sin compuestos inquemados. Se denomina teórica porque en la práctica siempre aparecen inquemados, aunque sea en pequeñas proporciones.

- **Combustión con exceso de aire.** Realizada con más aire del teóricamente necesario, no genera inquemados y en el humo se aprecia O_2 .

- **Combustión con defecto de aire.** Caso opuesto al anterior, menos aire del necesario produce una oxidación incompleta y se producen inquemados.

En los humos generados de la combustión se consiguen las sustancias detalladas en la tabla siguiente:

Tabla 3.1. Sustancias presentes en los humos de la combustión. **Fuente:** Brizuela y Romano, 2003.

Fórmula Química	Nombre	Procedencia principal	Otras procedencias
CO ₂	Dióxido De carbono	Combustión de sustancias que contienen C.	Componente no combustible del combustible.
H ₂ O	Vapor de agua	Combustión de sustancias que contienen H ₂ .	Combustible húmedo
N ₂	Nitrógeno	Aire.	Componente no combustible del combustible.
O ₂	Oxígeno	Combustión realizada con aire en exceso.	Un gas combustible puede tener O ₂ en su composición.
CO	Monóxido de carbono	Combustión realizada con aire en defecto.	Un gas combustible puede tener CO en su composición.
H ₂	Hidrógeno	Combustión realizada con aire en defecto.	
C	Carbono (hollín)	Combustión realizada con aire en defecto.	
SO ₂	Dióxido De Azufre	Presencia de S en el combustible.	Un gas combustible puede tener SO ₂ en su composición.

3.1.2. Incineración de residuos (WI)

La incineración se trata básicamente de una reacción química exotérmica, con desprendimiento de gran cantidad de calor que puede ser aprovechado de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas. Esta reacción es la usada en el tratamiento de los desechos: (residuos sólidos urbanos, industriales peligrosos y hospitalarios, entre otros).

Consiste en aplicarle a los residuos calor intenso en hornos a los fines de producir la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en ceniza, con temperaturas que varían entre 500 °C hasta 800 °C. Se usa como una alternativa de tratamiento para los residuos sólidos urbanos en los centros

urbanos e industriales, aunque también es una buena solución en el tratamiento de residuos peligrosos y hospitalarios.

En el documento BREF del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011) se presenta la incineración de residuos urbanos como “(...) una parte de un sistema de tratamiento de residuos complejo que, en su conjunto, permite la gestión de la amplia gama de residuos que genera la sociedad” (p. 1). El objetivo que se persigue con la incineración de residuos es reducir su volumen y bajar su peligrosidad, destruyendo las sustancias que podrían resultar dañinas. Cabe destacar que bajo la denominación de instalación de incineración se incluyen los diferentes equipos que se destinan al tratamiento térmico de los residuos, independientemente de que se recupere o no el calor producido por la combustión.

La incineración de residuos ofrece algunas ventajas como que sus procesos “(...) también pueden ofrecer un medio que permita la recuperación del contenido energético, mineral o químico de los residuos” (p. 1, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011), en parte debido a que, en su heterogeneidad, contienen básicamente minerales, metales, agua y sustancias orgánicas, lo que posibilita la creación de gases de combustión donde se consigue la mayoría de la energía de combustión en forma de calor.

Una de las características más notables de una planta incineradora es que los gases calientes producidos en la incineración se utilizan para calentar vapor que mueve una (o unas) turbina para generar electricidad. Parte de esta electricidad sirve para el funcionamiento de la planta y el resto se puede llevar a la ciudad.

Las sustancias orgánicas de los residuos se queman al alcanzar la temperatura de ignición necesaria y entrar en contacto con oxígeno. El proceso de combustión en sí se produce en la fase gaseosa en fracciones de segundo, liberando energía de forma simultánea. Cuando el poder calorífico del residuo y el suministro de oxígeno es suficiente, se produce una reacción térmica en cadena y de combustión autoalimentada que no requiere la adición de otros combustibles. En

el documento BREF se recoge que el sector de incineración puede ser clasificado de acuerdo con los siguientes subsectores principales:

- i. Incineración de residuos urbanos mixtos: Normalmente tratan basuras y residuos domésticos mixtos y generalmente sin tratar, pero en ocasiones pueden incluirse ciertos residuos industriales y comerciales (...).
- ii. Incineración de residuos urbanos u otros residuos pretratados: Instalaciones que tratan residuos que han sido selectivamente recogidos, pretratados o preparados en algún modo, de forma que las características de los residuos difieren de los residuos mixtos (...).
- iii. Incineración de residuos peligrosos: Incluye la incineración en plantas industriales y la incineración en plantas comerciales (...).
- iv. Incineración de lodos de depuradora: En algunos lugares, los lodos de depuradora se incineran separadamente de otros residuos en instalaciones específicas, dichos residuos se combinan con otros (ej. residuos urbanos) para su incineración.
- v. Incineración de residuos clínicos: Existen instalaciones específicas para el tratamiento de residuos clínicos, normalmente los procedentes de hospitales y otras instalaciones sanitarias, en forma de instalaciones centralizadas o en las dependencias de los distintos hospitales, etc. (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011, p. II, III).

En los procesos de incineración es normal la generación de cenizas. En un documento del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2012), se explica que en la incineración de residuos sólidos urbanos:

Se generan varios tipos de residuos *cenizas de hogar o escorias* (residuos generalmente combinación de material total o parcialmente quemado) (...) *cenizas volantes* (residuos constituidos por aquellas partículas que son arrastradas por la corriente de gases al exterior de la cámara de combustión) (...) (p. 2)

De estas cenizas se destacan las volantes. Nieto, Guijarro, Atanes y Fernández (2015) aclaran que las cenizas de este tipo proveniente de la incineración de RSU son muy diferentes a las que se producen en centrales térmicas. Estas últimas son mayoritariamente de composición silícea, "(...) polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas originadas por la combustión del carbón pulverizado (...) compuesto fundamentalmente de SiO_2 y Al_2O_3 " (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011, p. 1).



Figura 3.1. Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos, RSU. **Fuente:** Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2012.

Tal como ocurre en la naturaleza los metales no se consiguen en estado puro en las cenizas. En este caso se encuentran como óxidos y también como sulfatos y cloruros en cantidades importantes, los cuales son, en buena medida, solubles en agua. Las cenizas volantes poseen un grado alto de extracción sólido-líquido o lixiviación, proceso consistente en la disolución de uno o más de los componentes de algún sólido pulverizado en contacto con un solvente líquido, produciendo un lavado del cual pueden extraerse las partes solubles potencialmente riesgosos para la seguridad ambiental por la contaminación de espacios permeables subterráneos de almacenamiento de agua. El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2012) recoge y señala una clasificación de las cenizas volantes, en función de:

- **Propiedades físicas.** Las cenizas dependen de la composición química de los incombustibles del carbón, grado de pulverización, temperatura de combustión, tipo de caldera y de extractor empleados, así como el método empleado para retirar las cenizas. Por características físicas se pueden señalar:

granulometría, plasticidad, capacidad de compactación, permeabilidad y mínima densidad seca.

- **Propiedades químicas.** Poseen una composición química que depende de la química del carbón y su composición variable entre unas y otras. En general poseen como componentes principales: sílice, óxidos de hierro, cal y carbón sin quemar. Son clasificadas por la norma ASTM C 618-08a de acuerdo con el porcentaje de cal que contienen, en las clases: F, producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso con cantidades de cal inferiores al 15 %; y C, obtenidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, con porcentajes de cal entre 15 % y 30 %. La composición química de termina una clasificación de las cenizas volantes en cenizas sílico aluminosas, denominadas también puzolánicas; o no activas, con contenidos en CaO inferiores al 10 %.

Los investigadores Nieto, Guijarro, Atanes y Fernández (2015), explican que cuando se incineran compuestos orgánicos con contenido de cloro y calcio, como es el caso de la mayoría de los residuos sólidos urbanos, aplicándoseles un tratamiento de gases residuales con cal, se provoca una reacción de las cenizas volantes procedentes del proceso con desprendimiento de hidroxiclورو de calcio e hidróxido de calcio, además de metales pesados, que pueden ser sometidos al proceso de lixiviación, y otro conjunto de sustancias tóxicas tales como dioxinas y furanos, que los convierten en residuos tóxicos de acuerdo con la lista europea de residuos contenida en la Orden MAM/304/2002 (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

En el proceso de incineración la generación de productos está repartida de la siguiente manera: 75 % gases de combustión y 25 % de sólidos, siendo de ellos 21 % escorias y cenizas de fondo y el 4% final cenizas volantes que se componen de partículas finas y poseen un peso ligero, encontrándose generalmente en los gases de combustión. Son sobre todo los sólidos los que plantean mayores problemas ambientales por su alto contenido de metales pesados (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011).

3.2. TECNOLOGÍA DE LA INCINERACIÓN.

Son varios los parámetros que se deben revisar y manejar para obtener una incineración más eficiente y con un impacto ambiental lo más bajo posible. Uno de esos parámetros lo constituye la naturaleza de los residuos a incinerar. Es aconsejable poder revisar los residuos y separar los diferentes materiales, de manera que se puedan sacar de allí aquellas sustancias que no son combustibles.

Además, mientras más homogénea sea la mezcla de residuos, será menos complicado el poder controlar las temperaturas en el incinerador. Al realizar una revisión previa de los residuos se pueden recuperar materiales que aún pueden ser útiles y que serían destruidos al incinerarse. Una alternativa importante para el reciclaje de los metales lo representa la recolección y separación de los desechos para su disposición en contenedores adecuados, pero si en una ciudad se cuenta con una planta incineradora de residuos, se puede considerar la posibilidad de reciclar las cenizas producidas en la incineración para obtener material útil, como por ejemplo los metales no ferrosos.

3.2.1. Incineradores con alto contenido de oxígeno

Para que ocurra una combustión adecuada, completa, de los residuos debe existir una cantidad suficiente de oxígeno dentro del incinerador. De allí la importancia de realizar los cálculos pertinentes acerca de la cantidad de oxígeno por hora requerido, de acuerdo con la naturaleza de los residuos, y el tiempo de permanencia de los residuos dentro del incinerador (tiempo de residencia), y en consecuencia diseñar los procesos de alimentación de aire de la planta. Colocando los residuos durante el tiempo suficiente, se garantizará un mayor porcentaje de combustión, es decir, una combustión más completa.

3.2.2. Minimización del impacto ambiental de la incineración

Uno de los factores más críticos en la emisión de gases de los incineradores es la contaminación por la presencia de furanos y dioxinas, sustancias altamente tóxicas que tienen que ver con las temperaturas medias que se alcanzan al enfriarse los incineradores, entre 200 °C y 400 °C. Por eso se recomienda un enfriado rápido para evitar estos rangos de temperatura. Así mismo se recomienda altamente el rociar con carbón activado en polvo sobre el material.

3.3. COMPOSICIÓN DE LA CENIZAS DE FONDO A PARTIR DE RSU.

De acuerdo con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2012), CEDEX, los procesos de incineración exigen cantidades altas de combustible. En virtud de que los RSU no aportan suficiente material de este tipo se resuelve este problema con el aporte de materiales orgánicos de índole polimérica, tales como el policloruro de vinilo, PVC, que requiere de altas temperaturas para controlar la formación de Policlorobifenilos (PCBs) que se convierten en fuentes generadoras de compuestos de cloro conseguidos en las cenizas volantes.

En las plantas incineradoras de RSU se acostumbra el uso de óxido de calcio para tratar los gases que allí se originan y así evitar compuestos de carácter ácido. Por las altas temperaturas de trabajo se genera hidróxido de calcio y hidroxiclورو de calcio, que formarán parte de las cenizas volantes

En el fondo de los incineradores quedan los restos de los materiales que permanecen después de la incineración. Algunos autores llaman indistintamente ceniza de fondo o escoria de fondo a todo lo que queda en el fondo del incinerador luego de la combustión, pero otros diferencian entre escoria de fondo y cenizas de fondo. Consideran escoria de fondo a los trozos sólidos más o menos grandes compuestos de vidrio, cerámica y metales. Así mismo llaman cenizas de fondo al material de color gris, liviano. Como componentes de las cenizas de fondo se

pueden tener: sílice, aluminio, hierro y calcio así como pequeñas cantidades de titanio, magnesio, sodio, potasio, fosfato, y trazas de bario, estroncio, rubidio y metales pesados como cobre, zinc, plomo cromo níquel y cadmio (Luna, 2013).

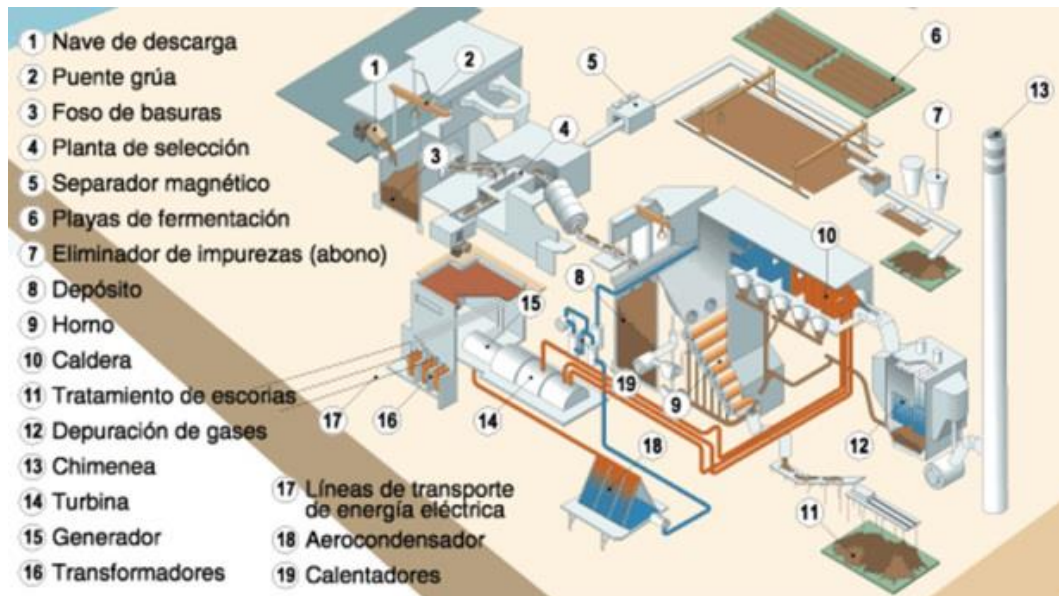


Figura 3.2. Esquema de funcionamiento de central de incineración de RSU.
Fuente: Global Electricity, 2013.

3.4. SOLIDIFICACIÓN DE LAS CENIZAS DE FONDO.

Según Gutiérrez (2015) existe una marcada tendencia en la generación de residuos sólidos, una merma en espacios disponibles para vertederos y un marcado interés en la gestión de RSU, siendo “(...) la incineración de residuos sólidos urbanos una de las técnicas más eficaces de gestión de residuos debido a que reduce el volumen y la masa de los residuos en un 90% y 70% respectivamente” (p. 8).

En relación con las cenizas de fondo refiere Gutiérrez (2015) que son consideradas en general como materiales no tan peligrosos, teniendo uso o aplicación en la fabricación de cerámica tradicional y agregados. Spence y Shi, (2005), y Conner (1990) (referenciados por Luna, 2013), han explicado la estabilización/solidificación (E/S) de residuos como una tecnología para el manejo de cenizas de fondo que implica la adición de uno o más agentes aglomerantes

y aditivos para disminuir la capacidad de lixiviación de los contaminantes existentes en los residuos, antes de ser depositados en vertederos, haciendo de ellos residuos con menor impacto al medio ambiente.

Es dable señalar que las cenizas de fondo sufren una serie de reacciones durante un lapso posterior a su producción, entre las que destacan las de solidificación, proceso de encapsulamiento del residuo formando materiales monolíticos o granulares sin que se encuentre siempre interacción química entre los aditivos y el residuo, que se producen al reaccionar con el dióxido de carbono para formar hidróxido de calcio y carbonato de calcio. Luego de 3 meses este material se considera estable y puede utilizarse, por ejemplo, para la construcción. Las reacciones detalladas que pueden ocurrir con las cenizas de fondo, son:

Reacciones de hidratación

Reacciones de solidificación: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Reacciones del sulfato: $\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$

Formación de sales: NaCl y KCl

Reacción del hierro: $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Después de la solidificación procede la estabilización, consistente en la aplicación de varias técnicas para minimizar la peligrosidad de los residuos haciéndolos menos solubles, menos tóxicos, en síntesis, hacerlos más estables químicamente sin generar, necesariamente, cambios en sus características físicas.

Como refieren Rodríguez e Irabien (1999), en correspondencia con los tipos de residuos a tratar y los agentes, orgánicos o inorgánicos, empleados en el tratamiento se aplicará un tipo de tecnología en el proceso de estabilización/solidificación. Los agentes orgánicos empleados pueden ser asfaltos o materiales bituminosos, poliésteres, poliolefinas o glomerantes poliméricos. Entre los inorgánicos se cuenta distintos tipos de cementos,

puzolanas naturales, yeso, cal, polvo de hornos de cemento, escorias de combustión de carbón escorias de alto horno y cenizas volantes.

La estabilización/solidificación basada en cemento es un proceso de larga data utilizado para tratar residuos peligrosos y radiactivos, debido a su coste y disponibilidad. Conner y Hoeffner (1998) y Spence y Shi, (2005) afirman que el cemento Pórtland Ordinario, tipo I, es el más utilizado para la estabilización de residuos. La ceniza volante originada en la combustión de carbón pulverizado es un aditivo altamente utilizado en las distintas formulaciones empleadas para la E/S de residuos por su carácter puzolánico, en dos métodos básicamente, los basados en la cal y los basados en cemento Portland.

CAPÍTULO 4. LOS METALES EN LOS RSU

CAPÍTULO 4. LOS METALES EN LOS RSUI

Los residuos sólidos, su aparición y evolución, se dieron como consecuencia de las actividades del hombre como productor y consumidor. Y evolucionó de tal forma, ligado al crecimiento de los núcleos poblacionales urbanos y a la extracción y transformación de elementos naturales, sobre todo a raíz de la revolución industrial, que la sociedad empezó a confrontar dificultades para su tratamiento y disposición.

A partir del siglo XIX la composición de los residuos sólidos urbanos se hace diferente, y ya en el siglo XX, con el desarrollo tecnológico cada vez más vertiginoso, los residuos se tornan de una complejidad difícil de manejar, pues su naturaleza heterogénea y dispar (orgánicos, plásticos, vidrios, metales, etc.), y los volúmenes generados comprometen seriamente la gestión en su disposición final, manejo de espacios para tratamiento y disposición, amén de los impactos negativos que sobre el medio ambiente logran causar, afectando incluso las posibilidades de calidad de vida de las futuras generaciones.

Los residuos sólidos urbanos industriales son los generados por las actividades productivas de la industria y que generalmente suelen ser altamente contaminantes, siendo muy diversa su naturaleza (químicos, mecánicos, sólidos, líquidos, gaseosos, etc.). La ingente fabricación de aparatos eléctricos y electrónicos de vida útil cada vez más corta y alarmante, multiplica la generación de desechos contentivos de metales, minerales y plásticos, los que retornan a la naturaleza en forma de residuos, con su poder completo de toxicidad y contaminación.

En la industria también se generan desechos metálicos como recortes de láminas, contenedores de sustancias líquidas, etc. Los metales que se

generan como desechos domésticos provienen, sobre todo, del uso de envases y latas de bebidas, aparatos eléctricos y electrónicos en desuso, baterías, muebles y diversos objetos metálicos, residuos de obras de construcción y reparación en las casas. En los últimos tiempos, gracias en parte a la preocupación por el cambio climático, se han logrado avances importantes, aunque nunca suficientes en los sistemas de gestión de los residuos sólidos, con soluciones como la disposición en vertederos, los tratamientos térmicos, la reutilización mediante reciclaje, medidas orientadas a mitigar los efectos de los RSU sobre el ambiente y la salud de las personas.

4.1. EFECTOS DE LA INCINERACIÓN.

La incineración de residuos, como ya se ha explicado, es la aplicación de calor intenso en hornos a los residuos aplicarle a los fines de producir la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en ceniza. Se vende la idea de que el tratamiento de residuos sólidos mediante incineración los elimina, pero la realidad es que la materia, que es energía, no se destruye sino que se transforma, lo que indica a las claras que la incineración también genera residuos. Robles-Arangiz (2006) señala que ignorando otros residuos y considerando solo las cenizas, la reducción en volumen es de 45 % y en peso de 33 %, por lo que este autor pone en duda la viabilidad del método.

E insiste que es amplio el volumen de generación de sustancias tóxicas y peligrosas derivadas de la actividad de incineración, las que permanecen con consecuencias sobre la salud y el ambiente. La incineración libera cenizas contaminantes, forma sólida, gases y líquidos para el lavado de los gases, sustancias todas altamente resistentes, tóxicas y acumulables en los tejidos de los organismos vivos, como dioxinas y furanos, así como metales pesados, partículas y otros materiales contaminantes, con efecto profundamente nocivo sobre la salud.

4.1.1. Cambios macroscópicos debido a la incineración

Al producirse la incineración de los residuos sólidos ocurre la combustión completa de los residuos orgánicos, lo que genera gran cantidad de humos. Principalmente por la combustión ocurre la reducción del volumen de los residuos, convirtiéndose en cenizas, y debido a la temperatura se producirá la fusión de algunos de los componentes metálicos.

Se conoce que la temperatura promedio de un incinerador es de 850 °C. A esa temperatura son muchos los metales que no alcanza su punto de fusión: ni el hierro porque su punto de fusión es mucho más alto, 1.538 °C, ni el cobre, temperatura de fusión es de 1.085 °C, ni la plata, temperatura de fusión de 960 °C. En cambio en estos incineradores se fundirán metales no férricos como el aluminio, 660 °C, el plomo, 328 °C y el zinc, 419 °C (Terry, 1995). Los metales una vez fundidos se solidifican al enfriarse los residuos. Los no férricos constituyen entre el 0,5% y el 3% del total de los residuos incinerados. Entre un 55% y un 70% de estos metales no férricos son partículas de aluminio. El mercurio ebulle y escapa a la atmósfera.

Debido a que la incineración provoca un perfil heterogéneo de temperaturas dentro del horno, unas zonas de éste estarán más frías que otras y esto permite que algunas piezas de aluminio conserven su forma sin fundirse. El tamaño de las partículas de aluminio que se generan, generalmente son inferiores a 1 mm.

4.1.2. Cambios microscópicos debido a la incineración

Durante la incineración las capas externas de las piezas de aluminio se oxidan y evitan que el resto lo haga. La formación de esta capa de alúmina produce una gran cantidad de energía, comparable a la combustión de otros materiales como el plástico y los residuos orgánicos. Este es un fenómeno que puede ser interesante, puesto que esta energía calórica de oxidación del aluminio puede ser utilizada para producción de electricidad o calefacción. De igual forma se producen

óxidos de los otros metales, que no sufren mayores alteraciones debido al tratamiento térmico, permitiéndoles ser reutilizados una y otra vez.

4.2. LOS METALES EN LAS CENIZAS DE FONDO.

En el fondo de los incineradores quedan los restos de los materiales que permanecen después de la incineración. Algunos autores llaman indistintamente ceniza o escoria de fondo a todo lo que queda en el fondo del incinerador luego de la combustión. Otros, como Menéndez, Álvaro, Argiz, Parra y Moragues (2013), hacen diferenciaciones entre escoria y cenizas, considerando escoria de fondo a los trozos sólidos más o menos grandes, entre cuyos componentes se encuentran vidrio, cerámica y metales. Así mismo llaman cenizas de fondo al material liviano de color gris.

Como componentes de las cenizas de fondo se pueden tener: sílice, aluminio, hierro y calcio así como pequeñas cantidades de titanio, magnesio, sodio, potasio, fosfato, y trazas de bario, estroncio, rubidio; y metales pesados como: cobre, zinc, plomo, cromo, níquel y cadmio. Otros metales que pueden hallarse, aunque en menor proporción son el titanio, el oro y la plata.

4.2.1. Alteraciones

La principal alteración que sufren los metales al incinerarse es la oxidación, pero los óxidos metálicos al fundirse recuperan su forma metálica una y otra vez.

4.2.2. Propiedades

Las propiedades físicas y químicas de las cenizas, tanto de fondo como volantes (las recogidas por las trampas de las chimeneas), van a depender del tipo de residuos a incinerar y del tipo de incinerador empleado. En las cenizas se encuentran compuestos como óxidos de aluminio y de hierro y metales como plomo, níquel y cobre.

Las cenizas volantes contienen una mayor proporción de sustancias peligrosas a la salud, caso de cloruros, dioxinas y furanos, siendo su pH marcadamente alcalino debido a la presencia de hidróxido de calcio y carbonato sódico utilizados para la neutralización de gases ácidos. Gran parte del material es de forma granular de color es gris claro, con un diámetro que varía entre 1 mm y 2,5 cm. Un 20% aproximadamente está constituido por piezas de tamaño cercano a los 10 cm.

CAPÍTULO 5.

PROCESADO DE

LA CENIZA DE

FONDO

CAPÍTULO 5. PROCESADO DE LAS CENIZAS DE FONDO.

Una vez que los residuos sólidos se someten a incineración, prácticamente la totalidad de la carga orgánica desaparece y queda como cenizas de fondo, en su mayor parte, un material granulado. Este material está constituido principalmente por vidrio, cerámica y otros materiales no metálicos. Además está la presencia de hierro y de metales no férricos. Las cenizas volantes, que son las que van hacia las chimeneas y que son atrapadas por los correspondientes filtros, como ya se ha explicado, contienen sustancias tóxicas como las cloradas, dioxinas y furanos, las cuales no deben mezclarse con las cenizas de fondo, y que deben tener una disposición especial, a fines de contaminar el ambiente lo menos posible. Una alternativa puede ser el mezclar estas cenizas con material bituminoso.

Las cenizas de fondo, a su vez, constituyen un material heterogéneo y de propiedades inestables al principio, por lo cual se requiere de una serie de técnicas de procesado que permitan agregar valor al material. Estas cenizas pueden ser sometidas a tecnologías que hagan posible a partir del reciclaje, obtener materiales todavía utilizables en la fabricación de nuevos productos, como es el caso de los no metales. En el caso de estos, pueden ser dejados un tiempo en el incinerador para permitir que ocurran reacciones químicas como las de oxidación. También pueden mezclarse con otros materiales para obtener áridos de mediana calidad, aptos para su uso en construcción.

Los componentes férricos pueden ser separados mediante el uso de poderosos imanes para su reciclaje, a través de la aplicación de procesos de refundición. Y por último, están los metales no férricos, que pueden constituir entre un 3 % y un 10 % del total de las cenizas, pero que son materiales de alto valor, y que requieren de ciertos procesos más o menos sofisticados o laboriosos para su obtención y reutilización. A continuación se describen algunos de los procesos a los cuales pueden someterse las cenizas de fondo, con el objetivo de separar el material metálico no férrico.

5.1. CONMINUCIÓN.

La conminución es un proceso que consiste en someter cualquier material a trituración para la reducción de tamaño de las partículas mediante el uso de diversas técnicas, tales como: el uso de rodillos, molinos de bola, molinos rotatorios, de impacto, trituradoras (chancadora) o por cualquier otro método que permita la fractura y disminución de tamaño del material (Vega, s.f). En función de la aplicación de carga y de la mecánica de la fractura, será posible obtener un mecanismo de falla en el material y una distribución granulométrica particular.

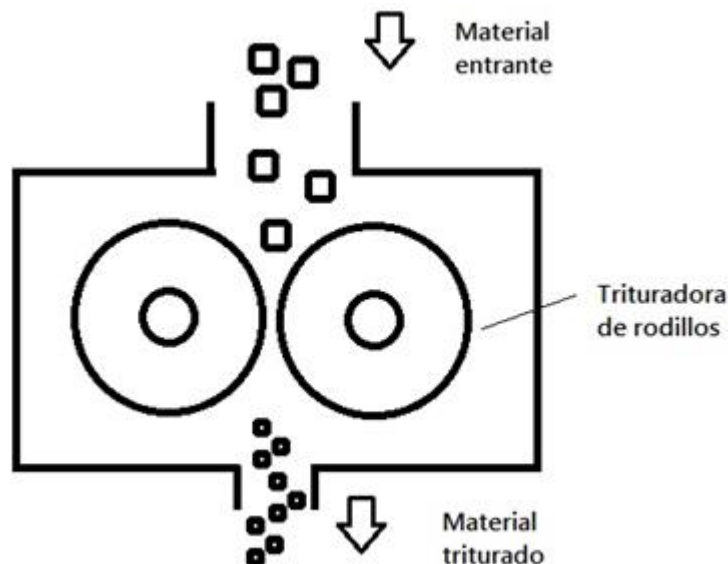


Figura 5.1. Esquema de máquina trituradora de materiales. **Fuente:** Beke, 1964.

La teoría de la conminución, según plantea Mendoza (2017), establece que en presencia de la aplicación de cargas de tracción, los materiales experimenten comportamientos elásticos y plásticos, en función de la fragilidad de los mismos. En adición, plantea que mientras mayor sea el volumen del material a triturar se incrementa la probabilidad de ocurrencia de defectos, disminuyendo la energía a aportar para la producción de la fractura, y al contrario, para volúmenes más pequeños se requiere mayor cantidad de energía para la fractura del material.

La conminución puede ser usada como proceso inicial de preparación del material antes de ser sometido a métodos de separación para la obtención de los metales que se desean recuperar. Todo depende del diseño de la planta de recuperación, y de los tipos de maquinarias a emplear en procesos posteriores establecidos.

En el caso de los residuos sólidos urbanos el proceso de conminución dependerá de su composición (vidrio, plástico, orgánico, desechos de construcción, etc.), lo que establecerá el tipo de trituración a aplicar. Como ejemplo, a las baterías de ion-litio de los teléfonos y otros aparatos eléctricos y electrónicos se les aplica una conminución de orden mecánico de ruptura para convertirlas en partículas más pequeñas sin alterar su naturaleza química, provocando fractura o quebrantamiento por efecto de la presión mecánica (Kaya, 2016).

Kang y Schoenung (2005), y Osorio, Restrepo y Marín (2013) exponen que en el caso de conminución en dispositivos electrónicos y material de reciclaje, es preferible usar fuerza de cizallamiento en las etapas de trituración inicial para dejar expuesto el interior de los dispositivos. De otra manera, por compresión o choque, se corre el riesgo de aprisionar constrictivamente con la armazón los elementos interiores, dificultando su extracción.

5.2. CLASIFICACIÓN.

La clasificación es el paso siguiente después de la conminución del material, y puede realizarse por diferentes vías, como pueden ser atendiendo al tamaño de las piezas o partículas, granulometría, o al peso del objeto. En el caso del reciclaje de residuos electrónicos, se recomienda el tamizado después del proceso de trituración inicial para una clasificación inicial. Se realiza una segunda trituración y se reclasifican las partículas en función del tamaño de acuerdo con el tamiz utilizado. Posteriormente se debe realizar una última molienda con el objetivo de

aumentar las fracciones de finos de material útil (Sánchez, Betancur y Ocampo, 2016).

La criba o tamizado de las partículas se realiza regularmente utilizando una máquina que consiste en una serie de cintas corredizas transportadoras, pero que en lugar de ser correas sólidas son cribas o mallas de diversos tamaños en los orificios, colocadas una encima de la otra, de tal manera que las piezas o partículas menores al tamaño de la abertura de la malla caen a la criba inmediatamente inferior, y el resto se transporta para retritución. El proceso puede repetirse en las mallas inferiores, lográndose una clasificación por tamaño de piezas o partículas.

5.3. SEPARACIÓN.

Son diversos los métodos de separación de los componentes de los residuos sólidos una vez incinerados. La utilización de algunos de ellos depende de las necesidades de los diseñadores, atendiendo al tipo de producto final que se desea obtener. En el caso que ocupa a este trabajo, se desea un producto final consistente en metales no férricos, provenientes de aparatos eléctricos y electrónicos, de tal manera que en principio se necesita separar y apartar los no metales (vidrio, cerámica, etc.) de los metales, y entre estos, separar el hierro y el acero de los metales no férricos (aluminio, cobre, zinc, etc.). Se detallarán algunos de los procesos más utilizados de separación de estos materiales.

5.3.1. Separación magnética

La separación magnética es un proceso que se vale del uso aparato, separador magnético, cuyo componente principal es un imán poderoso que atrae a las piezas ferro magnéticas y paramagnéticas, magnetizadas temporalmente, y las separa del resto. El imán puede ser natural permanente, como el de Neodimio, material de tierras raras, en aleación con hierro y boro, el cual es de gran potencia, siendo el más utilizado. También puede ser un electroimán. Ciertamente existe gran

variedad de modelos de separadores, siendo los más reconocidos el de imán superior y el de tambor.

5.3.1.1. Separador magnético de imán superior.

El modelo de imán superior está caracterizado por dos cintas transportadoras, una inferior a través de la cual viene el material de alimentación, (mezcla de material ferro magnético y no ferro magnético, y una correa transportadora superior cerca de la cual se localiza el imán que atrae el material ferro magnético adhiriéndolo temporalmente a la correa superior, hasta llegar a una zona no magnética donde cae separado del resto del material, el cual sigue otro camino. Así puede separarse el material ferro magnético, mientras se continúa el proceso de tratamiento del resto de materiales, no metales y metales no ferrosos.

5.3.1.2. Separador magnético de tambor.

Otro modelo de separador magnético es el de tambor. Su componente principal es un cilindro rotatorio que axialmente tiene una mitad magnética y una mitad no magnética. El tambor rota a gran velocidad y sirve como correa transportadora del material, solo que las partes ferro magnéticas quedarán adheridas al tambor hasta llegar a un deflector de separación, y al llegar a la zona no magnética caerán a un lugar preparado, separándose del resto de materiales.

5.3.1.3. Separador por corrientes de Foucault.

El separador de metales no férricos por corrientes de Foucault es un aparato que se basa en la emisión de un campo magnético pulsante o alterno, con polaridad cambiante de positivo a negativo muchas veces por segundo, a una cierta frecuencia, creando unas corrientes llamadas corrientes de Foucault cuando es atravesado por metales no férricos. Se genera entonces durante el proceso una repulsión magnética que hace que la pieza de metal salga despedida lejos del tambor magnético.

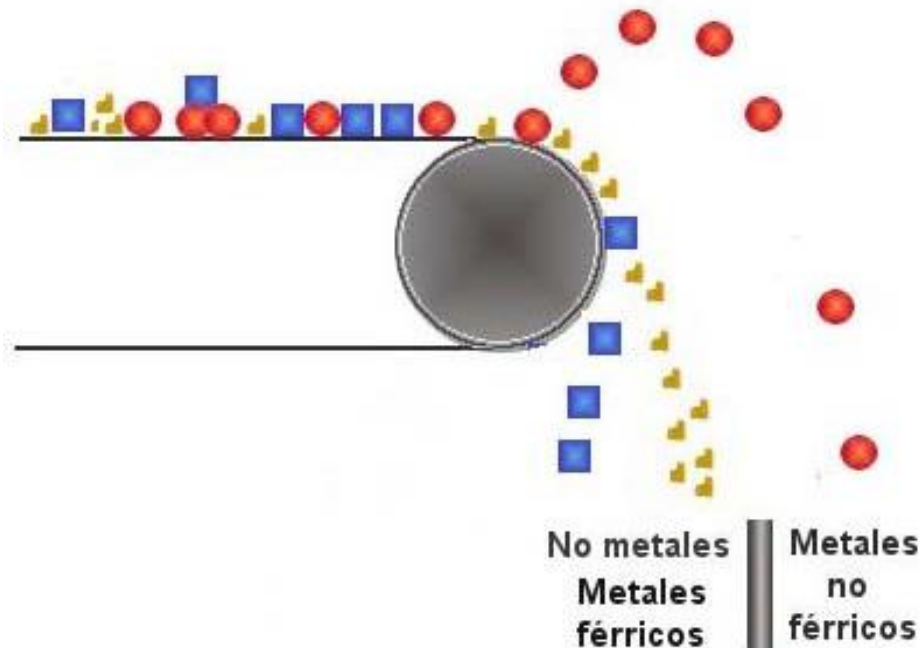


Figura 5.2. Separación de metales no férricos por corrientes de Foucault. **Fuente.** Interempresas, 2007.

Esta propiedad es aprovechada para separar las piezas de metal no férreo, al colocar una lámina o separador, por encima de la cual la pieza salta y cae hacia otra vía de transporte. Al mismo tiempo el tambor magnético atrae las piezas de metal férreo, por lo cual, mediante el separador adecuado, se puede aprovechar este desvío para separar estas otras piezas. Los residuos no metálicos siguen su trayectoria parabólica normal. De esta manera en la salida del separador se tendrán tres corrientes de material: férricos, no metálicos y metales no férricos.

Según la empresa Regulación de Motores, S.A. (s. f.) los metales no férricos, o no ferrosos, sufren un efecto de repulsión siendo arrojados muy por delante del Tambor de Foucault. Los férricos, son atraídos pero no se separan del flujo del material de manera clara, debido a la excentricidad, quedando unidos con los no metales. Estos últimos no son influenciados por el aparato y siguen la trayectoria de caída natural. Las corrientes de Foucault generan en los metales no férricos un campo magnético opuesto al campo creado por el tambor inductor excéntrico, de tal modo que un metal no férreo será expulsado de su trayectoria normal, separándose de esta forma del resto de materiales.

5.3.1.4. Separador por sensores de inducción.

El Separador de Metales por Detección Inductiva y válvula de soplado permite separar los metales, férricos y no férricos, del resto de materiales. Cercano a la cinta por donde se transportan los residuos sólidos, se coloca un detector de metales por inducción. Cuando el aparato detecta la cercanía del metal, sin que ocurra un contacto físico, envía una señal electrónica hacia una válvula de soplado que hace que el material deseado se desvíe de la ruta de los demás materiales, logrando su segregación.

El detector posee una bobina de oscilación que produce un campo magnético oscilante a una cierta frecuencia, Hz o ciclos por segundo. Cuando una partícula o pieza metálica no ferrosa cruza el campo magnético, se genera una corriente eléctrica inducida que hace variar la frecuencia del campo oscilante original. Existe una segunda bobina que detecta la variación del campo. El aparato detector es capaz de comparar estas variaciones con patrones almacenados para saber si es el metal que se desea separar, enviando entonces el pulso eléctrico que activa la válvula sopladora para separar la pieza.

Es de hacer notar que cuando un objeto de metal no ferroso se acerca al detector aumenta la frecuencia de oscilación. El detector compara esta frecuencia con la frecuencia de referencia y emite la señal. Si el metal es ferroso la oscilación disminuye y no se puede programar el detector para que no emita señal en este caso.

5.3.2. Separación por gravedad

5.3.2.1. Separación gravimétrica de metales por corrientes verticales.

Es un método de separación que hace uso de la gravedad para que ocurra la separación, debido a las diferentes densidades de los sólidos a separar. El método es efectivo al aprovecharse de las diferentes velocidades de sedimentación de las partículas sólidas, algunas livianas y otras más pesadas. La tecnología implica el

uso de un aparato que tiene un tanque donde está el material a separar, y desde el fondo se hace presión con un líquido que empuja, hacia abajo, y succiona, hacia arriba, creando una corriente vertical que mueve a las partículas y aumenta así la separación debido a la diferencia de densidades.

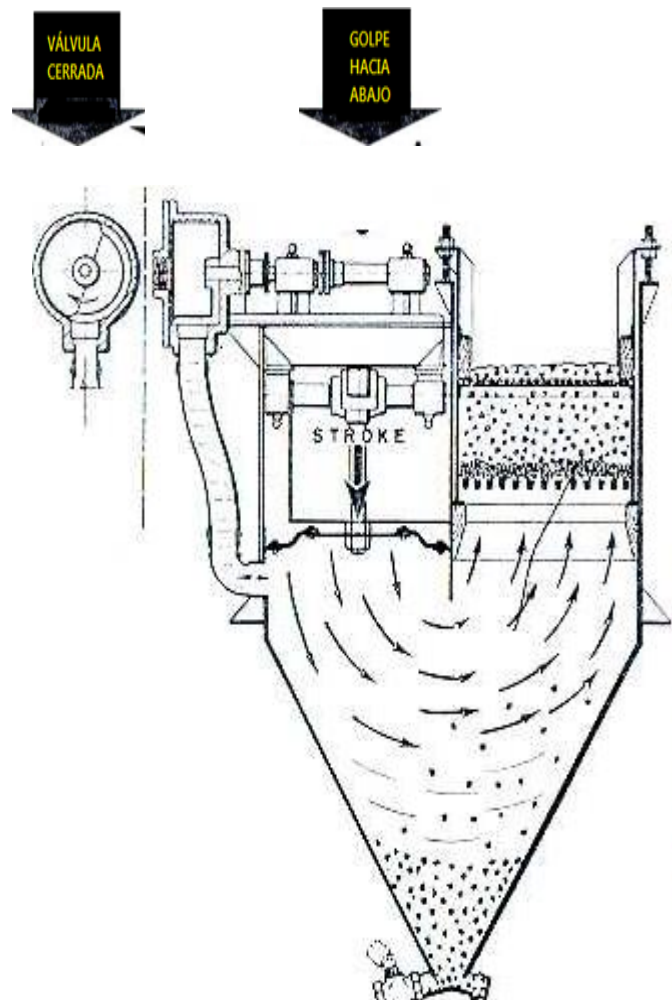


Figura 5.3. Separador gravimétrico por corrientes verticales. **Fuente:** Pavez, 2005.

5.3.2.2. Separador gravimétrico de metales por medios densos.

En este método de separación los residuos sólidos caen a un tanque que contiene un líquido cuya densidad es intermedia entre la densidad del material que se desea recuperar y el material que ha de desecharse. De esta forma el metal a recuperar se va al fondo, de donde se recoge para ser llevado a otras instalaciones, mientras el material a desechar flota en la superficie de donde se descarta.

Existen diferentes sustancias líquidas, como los hidrocarburos, e incluso mezclas utilizadas de líquidos y sólidos como medios densos para este método de separación, donde la principal fuerza de separación es la gravedad. Comercialmente se usan tres tipos de medios densos: líquidos orgánicos, como hidrocarburos, sales disueltas en agua y suspensiones de sólidos de granulometría fina en agua. Una variante del método consiste en triturar los residuos hasta convertirlas en nanopolvo. Se obtienen nanopartículas de estos tres componentes: polímeros, metales y óxidos. El proceso puede durar unas tres horas. Después, el polvo se sumerge en líquido para conseguir separar los componentes.

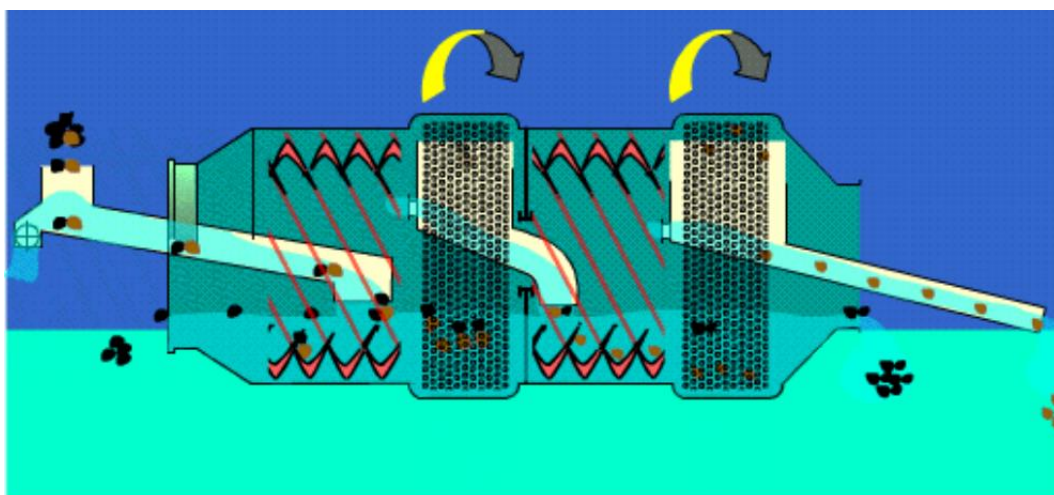


Figura 5.4. Separador de metales en medio denso del tipo tambor. **Fuente:** Pavez, 2005

5.3.3. Separación a mano

Este método de separación de residuos de incineración puede no ser muy efectiva debido a que los tamaños de las piezas a separar pueden ser pequeños y el color de los diferentes objetos puede ser muy uniforme, por lo que puede hacerse difícil la manipulación, así como el reconocimiento por parte de los operarios.

Es en un proceso en el cual se trasladan los residuos por una correa transportadora a una velocidad adecuada, para dar tiempo a que los operarios manuales puedan ver, seleccionar y separar los materiales deseados y colocarlos en otra zona. El procedimiento manual puede resultar algo lento, dependiendo del tipo de separación planteado, y por tanto puede resultar económicamente no rentable. Por otra parte, el material incinerado puede resultar nocivo a la salud de los operarios.

5.3.4. Otros. Separación de metales por sensores de rayos X

Este sistema detecta y separa las partículas o piezas mediante fluorescencia de rayos X. Un aparato envía rayos X a la pieza y esta emite una luz o fluorescencia característica según la composición del material. La detección es posible aun cuando las superficies estén sucias, que es lo común en metales procedentes de la incineración de residuos. El sistema de detección por rayos X puede combinarse con un sistema de reconocimiento láser 3D que permite ubicar con más precisión la pieza, pudiendo disminuirse así el uso de aire comprimido para la separación. Este sistema es excelente para el tratamiento de cenizas procedentes de incineradoras de residuos.

4.3. TÉCNICAS DE PROCESADO DE CENIZAS DE FONDO.

Plantea García (2018) que el procesado de las cenizas de fondo tiene como objetivo principal la separación de los metales ferrosos y no ferrosos, la reducción del tamaño de las partículas para la criba o tamizado y el envejecimiento de la

escoria tratada. Pueden plantearse varios esquemas de procesado, los cuales tienen cada uno sus ventajas y desventajas, y que combinándolas entre sí ofrecen mayores posibilidades de estudio. Un esquema tipo para el procesado de las cenizas de fondo, puede ser:

- Enfriar las cenizas con agua inmediatamente después de salir del incinerador. Este procedimiento tiene como ventaja el evitar o disminuir la producción de materiales tóxicos similares a los de las cenizas volantes. Otra ventaja es la de facilitar la manipulación del material para su transporte y posterior procesado.
- Separación de los materiales ferro magnéticos a través de un separador magnético. De esta forma se separan las piezas o partículas de hierro del resto de metales.
- Cribado con mallas de 20 a 60 mm. Pueden haber varias razones para la clasificación del material en diferentes porciones según la granulometría. Entre estas, una razón es que en los granos pequeños se encontrará el mayor porcentaje de metales no férricos, los cuales se desea coleccionar.
- Tratamiento posterior de los granos de 2 mm o menos en busca de metales no férricos.

Este tratamiento posterior puede hacerse con un separador por corrientes de Foucault, para la separación de los no metales y luego, si es necesario, este material de salida, mezcla de metales no férricos, puede ser sometido a tratamientos más refinados. En caso de requerirse, puede ser usando separadores por sensores de inducción, a fines de separar cada uno de los metales no férricos buscados. En el diagrama de flujo del gráfico siguiente se pueden apreciar los procesos.

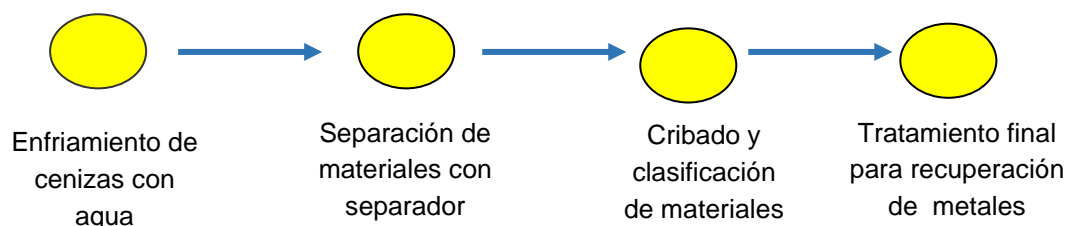


Figura 5.5. Diagrama de flujo de procesado de cenizas de fondo. Fuente: Elaboración propia.

5.5. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA.

El funcionamiento de una planta de incineración se da con el objetivo de reducir los residuos a cenizas, con los beneficios de reducción de volumen, fundición de componentes tóxicos, y, de ser posible, generación de energía, para lo cual es necesarios cubrir un conjunto de fases o etapas bien definidas, lo que contempla: el secado y desgasado, desprendimiento del contenido volátil; pirolisis y gasificación, descomposición de las sustancias orgánicas en ausencia de agente oxidante y reacción de los residuos con vapor de agua y CO₂; y oxidación, gases combustibles se oxidan a temperaturas de gases de combustión.

5.5.1. Rendimiento de la separación de materiales

Para establecer un parámetro de rendimiento de la planta se deben definir las características del material de salida que se desea obtener. Tomando como ejemplo la recolección y procesamiento de pilas alcalinas, un estudio desarrollado en la Comunidad Autónoma de Cataluña, por Ecopilas en el 2016 (referenciado por Gómez, 2018) determinó que el rendimiento en cuanto a los porcentaje de recuperación de algunos metales de importante de uso en la industria, sobre el volumen de pilas procesadas, alcanzó 16 % de manganeso (Mn), 4 % de Titanio (Ti), 2 % de níquel (Ni), 3 % de Cadmio (Cd) y Cobalto (Co) y 1 % de Litio (Li), entre muchos.

Otro reporte de Economía Circular y Minería Urbana (referenciado por Chiralde, 2019) señala que en un total de 50 toneladas de residuos electrónicos, se pueden recuperar 30 Kg. de oro (Au), 4 mil Kg. de plata (Ag) y 2.700 Kg. de bronce. En todo caso, lo interesante es saber que efectivamente con un tratamiento adecuado de este tipo de residuos sólidos se puede obtener un importante volumen de minerales y metales en recuperación que pueden tener aplicabilidad en nuevos procesos de producción. Es dable formular diferentes esquemas para evaluar el rendimiento de una planta diseñada para el procesamiento de las cenizas de fondo para extraer metales no férricos. Un método puede ser el siguiente:

- Tomar de la literatura disponible un valor para el porcentaje de metales no férricos presente en una muestra típica de cenizas de fondo.
- Tomar un valor base comparativo para la cantidad de material de entrada (cenizas de fondo) que la planta procesará.
- Calcular, para condiciones ideales (100% de eficiencia) la cantidad de material de salida, metales no férricos.
- Calcular, con base a la combinación de procesos de la planta, cuál será la cantidad teórica del material de salida, metales no férricos.
- Dividir esta última cantidad entre la cantidad ideal y obtener el porcentaje, el cual es un acercamiento a la eficiencia teórica de la planta.

Pueden plantearse varios esquemas de plantas y repetir el proceso anterior, pudiendo establecerse comparaciones entre ellas. Además puede considerarse cada maquinaria individual (cribadora, separador por corriente de Foucault, etc.) y revisar el conjunto de ventajas y desventajas que plantea su utilización.

5.5.2. Técnicas de mejora de Rendimiento

Se pueden considerar un abanico de opciones a la hora de intentar mejorar el rendimiento de la planta, con base en modificaciones sobre los procesos existentes y la evaluación del nuevo rendimiento, siempre considerando el efecto incremental en la relación costo-beneficio. Cabe señalar la intención de manejarse en este sentido con criterio de mentalidad abierta, ninguna posibilidad debe desestimarse.

Dentro de las posibilidades de técnicas para la mejora del rendimiento que pudieran utilizarse, se señalan: la clasificación manual previa del material de entrada; la opción de “madurar” o estabilizar durante unas semanas las cenizas de fondo a fines de que los no metales puedan venderse luego como áridos de mediana calidad, a ser utilizados para la construcción de viviendas y carreteras; la alternativa de coleccionar el material férrico para la venta. Estas, entre otras, aumentarían el rendimiento económico.

Si se considera solamente el aumento del rendimiento físico teórico determinado por la salida de los metales no férricos, habrá que considerar la sustitución de unos sub procesos por otros, o añadir algunas máquinas o equipos. Evaluando alternativas y comparando resultados de la relación entre la inversión económica necesaria y los beneficios a obtener, se podrán seleccionar las opciones que de verdad tengan impacto en la mejora del rendimiento.

CAPÍTULO 6.

METODOLOGIA

DEL ESTUDIO

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS.

La metodología a emplear para realizar un análisis comparativo de las técnicas para el procesamiento y valorización de residuos electrónicos, ha sido establecida con base en las actividades orientadas a obtener los mejores resultados posibles en la recuperación de metales no ferrosos y minerales aprovechables en la fabricación de nuevos productos.

Existen diversos métodos de caracterización de residuos sólidos urbanos, de acuerdo con regiones y países, que presentan variedad de parámetros y criterios de muestreo. Unos caracterizan los residuos desde las fuentes de generación, otros mezclados y compactados en la disposición final, y algunos otros aplican métodos de caracterización en las plantas clasificadoras (Runfola y Gallardo, 2009). Estas metodologías, aunque costosas, son sumamente importantes al momento de establecer la planificación en la gestión integral de los RSU.

Entre las principales metodologías con enfoque centrado en los volúmenes generados de RSU, los autores citados en el párrafo previo señalan: análisis de pesada total, considerando el total del peso de los RSU en las instalaciones de tratamiento o vertederos; análisis peso/volumen, se toma en cuenta la relación entre ambas variables, para determinación de la densidad; análisis de balance de masas, evaluación de entradas y salidas de materiales en sistemas limitados; y análisis por muestreo estadístico, con toma de un número de muestras aleatorias para determinar peso total y composición.

Para cumplir con lo previsto en los objetivos del trabajo en relación con el procesamiento de los residuos sólidos, en este caso residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE, se aplicará la metodología de análisis por muestreo estadístico, a partir de la toma de muestras aleatorias de residuos residenciales y comerciales de un vertedero definido, para determinar el

porcentaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos presentes en los volúmenes de residuos sólidos urbanos de esa localidad.

De la misma forma para el estudio de valorización de los residuos sólidos urbanos provenientes de aparatos eléctricos y electrónicos, se establecerán, en principio, los metales y minerales presentes en este tipo de desechos y su valor en el mercado como material reciclado en comparación con el precio del metal o mineral original, además de determinar aproximadamente los volúmenes recuperables de tales materiales en relación con los volúmenes totales procesados de residuos sólidos urbanos.

Para ello se tomarán muestras de material, las cenizas de fondo de una incineradora de una región de España, determinando su composición promedio, con énfasis en el porcentaje de metales no férricos, a partir de lo cual se tratará de establecer el volumen mínimo adecuado para que la actividad de recuperación de metales no férricos y minerales sea factible.

CAPÍTULO 7.

APILCACIÓN A

CASO PRÁCTICO.

(Muestras y análisis).

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN A CASO PRÁCTICO. (MUESTRAS Y ANÁLISIS).

Según el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2012), CEDEX, en España existen 10 plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos, RSU, cuyas localizaciones se encuentran preferentemente en las comunidades autónomas de la zona noreste, aunque una se localiza en La Coruña, Comunidad Autónoma de Galicia, y otra en la Comunidad de Madrid. El resto se haya en Cantabria, el país vasco, Canarias y Catalunya, tal como puede apreciarse en el mapa siguiente:



Figura 7.1. Ubicación de plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos RSU, en España. **Fuente:** CEDEX, Catálogo de Residuos utilizables en construcción, 2012.

Para realizar el estudio de procesamiento y valorización de residuos sólidos urbanos, RSU, muestreo y análisis, con especial atención en la presencia de residuos eléctricos y electrónicos en los volúmenes de desechos generados como residuos domésticos y comerciales, se decidió tomar una urbanización residencial de la provincia de Riudoms, en el municipio de Tarragona, Cataluña, al contar este municipio con una planta incineradora.

Para la caracterización del tipo de residuos generados se tomaron muestras de un camión recolector, dos veces al día por un total de 7 días, residuos causados por una población muestral compuesta por 100 viviendas residenciales y 20 comercios, para determinar el porcentaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE, generados. Los resultados arrojaron un promedio de 2,54 % de RAEE en relación con el volumen total de residuos, un porcentaje por debajo de la media de Cataluña 2,98 %, y de la media nacional española, 3 % (Plan de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, 2017).

Según el portal de estadísticas Statista (2019) en el año 2016 en la comunidad autónoma de Cataluña se recogieron 4.581 toneladas de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Caballero (2018) señala en un artículo de El Diario, con datos extraídos de la Universidad de las Naciones Unidas y de trabajos realizados en China y Australia sobre gestión y tratamiento de RAEEs, que de una tonelada de este tipo de desechos se pueden obtener alrededor de 3 kilogramos de diversos materiales (oro, plata, platino, paladio, cobre, aluminio y plomo, entre otros) contenidos en teléfonos, televisores y otros aparatos, y a un coste mucho menor que extraerlos de la tierra, con el añadido del menor impacto ambiental, pues la minería convencional requiere enormes cantidades de agua, químicos y combustible.

En cuanto a las estrategias y procesos para la valorización de residuos, dentro de las más conocidas se tienen:

- **el compostaje**, según Haug (1993) técnica biológica y oxidativa de los residuos orgánicos por la acción de microorganismos aerobios que generan

reacciones de elevación de la temperatura, con la reducción de peso y volumen y el oscurecimiento y humidificación. Sirve como abono orgánico.

- **La biometanización**, técnicas de tratamiento de recuperación mecánico biológica de la fracción orgánica recuperada de los residuos, para la producción de biogás, metano y dióxido de carbono, por un lado, y por la otra materia orgánica, digestos, para procesos biológicos para la obtención de material bioestabilizado (Rodrigo, Rodrigo y Fernández, 2014).

- **Valorización energética**, procesos técnicos aplicados a los residuos sólidos urbanos para la obtención de combustibles alternativos (biocarburantes, ecodiesel, incineración con recuperación de energía, desgasificación de vertederos, pirólisis, termólisis, etc.).

- **Recuperación de metales y minerales**, procesos de incineración de residuos para la obtención de metales y minerales reciclables de las cenizas de fondo, con aplicabilidad de uso en la producción de nuevos productos. Esta última opción señalada es la usual en la gestión y tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE.

Como un ejemplo concreto de esta estrategia de valorización de residuos se toma el de la incineradora de Tarragona, en la Comunidad Autónoma de Cataluña, incineradora operada por la empresa Sirusa. Tiene de capacidad operativa un flujo de procesamiento de 9,6 toneladas de residuos sólidos por hora, siendo el 44% de material combustible.

Del material de entrada, el 0,7 % está constituido por metales no férricos y otros minerales. En una hora se produce el 56 % de escorias o cenizas de fondo a partir del volumen de residuos, 9,6 toneladas, es decir, 5,28 toneladas de escorias o cenizas de fondo. Se obtienen 0,067 toneladas de metales no férricos o 67 Kg, conformando esto el 1,27 % del total de escoria producida. Así mismo, en esa escoria se hallarán en promedio 325 Kg. de material de hierro.

7.1. ARMADO DEL PROCESO.

Supóngase que se entrega la escoria a temperatura ambiente, seca, y que también su distribución granulométrica es la típica para este tipo de escoria, tal como se ve en la tabla siguiente:

Tabla 7.1. Propiedades físicas de las cenizas de hogar de RSU. **Fuente:** Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, 2012.

CENIZAS DE HOGAR⁽⁴⁾⁽⁵⁾		
Granulometría Porcentaje en peso (%)	0-1 mm	18
	1-2 mm	14
	2-4 mm	21
	4-6 mm	15
	6-16 mm	24
	16-40 mm	
Densidad de conjunto (g/cm ³)		1 –1,1
Absorción de agua (%)		2,36
Valor de abrasión de Los Ángeles (%)		40

En la tabla se puede apreciar que el tamaño de los componentes es bastante homogéneo, con 32 % de los granos de tamaño inferior a 2 mm. y 24 % es superior a 6 mm. Una característica de los metales no férricos es que el tamaño de las partículas de la escoria suele ser generalmente inferior a 2 mm. de tal manera que un primer proceso de separación se puede dar colocando una criba o zaranda (cedazo) vibratoria, para separar este grano fino del resto. Este material fino puede ya estar constituido por metales no férricos, lo cual simplifica y hace más efectiva la separación y purificación superior.

Por otra parte, el equipo de zaranda vibratoria es de gran sencillez y por tanto de bajo costo de adquisición y mantenimiento. Es menos factible la instalación de un triturador, conminución, en lugar de la zaranda, ya que en la trituración suele hacerse más difícil la separación entre el metal férreo y el no férreo utilizando la granulometría. Posterior al proceso de cribado, se puede utilizar un equipo de separación magnética de tambor, o de imán superior, para la separación del

material de hierro a la salida del material de granulometría fina, mientras se desecha el material de granulometría gruesa.

Después de separar el hierro, es dable tratar el material no férrico con un equipo separador de corrientes de Foucault. El material de entrada a este equipo debe consistir, básicamente, en metales no férricos y no metales. Los no metales se considerarán material de desecho, pudiendo contemplarse su posterior estabilización dejándolo “reposar” por varias semanas a la intemperie, y venta como material de construcción. De igual forma el hierro puede ser también recolectado para la venta.

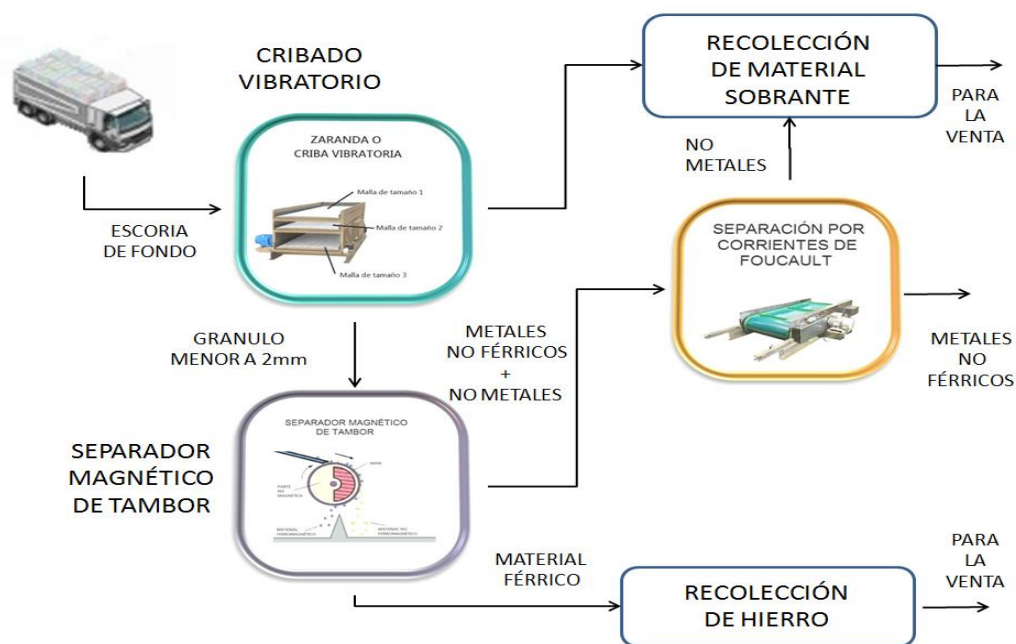


Figura 7.2. Alternativa 1 utilizando un proceso preliminar de cribado. **Fuente.** Elaboración propia.

Una segunda alternativa de valorización de residuos se puede dar a partir de la eliminación del proceso preliminar de cribado y separar directamente el hierro del resto de materiales gracias al separador magnético de tambor. Esta alternativa pudiera resultar más económica al eliminar un proceso intermedio y además el material ferroso podría recogerse en mayor cantidad, puesto que habría poca

pérdida de este en el cribado. Sólo hay que evaluar bien para ver si los ajustes en las características del separador por corrientes de Foucault encarecen el proceso. En primera instancia esta alternativa luce más atractiva que la alternativa 1.

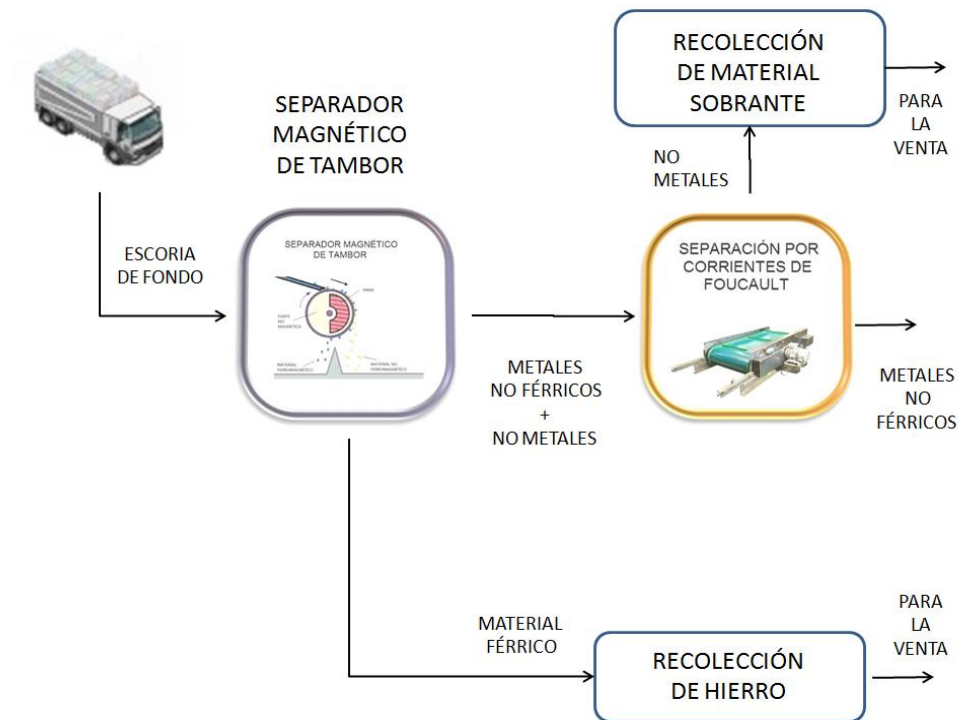


Figura 7.3. Alternativa 2 sin utilizar el proceso preliminar de cribado. **Fuente.** Elaboración propia.

La tercera alternativa que se plantea al respecto es buscar separar algunos de los metales no férricos, con el fin de aumentar el valor de venta de estos materiales. En este caso se coloca un aparato detector y separador de metales no férricos utilizando detectores por corrientes de inducción. Este aparato trabaja en conjunto con un sofisticado sistema de válvulas de soplado, que apunta sus flujos exactamente al sitio donde está la pieza a separar, con el objetivo de enviarla justo al contenedor deseado según el tipo de metal.

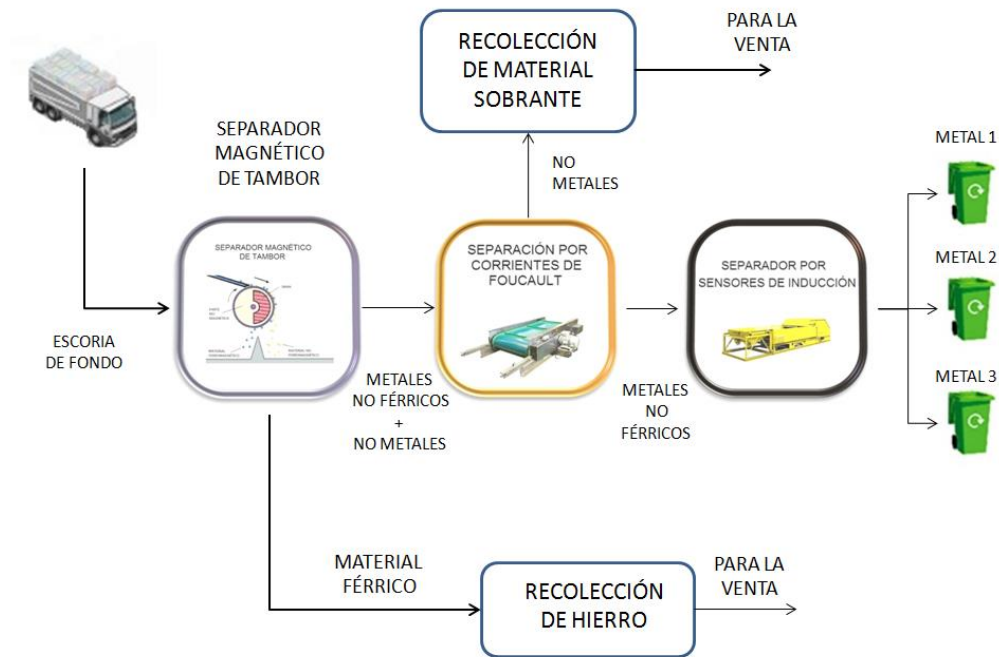


Figura 7.4. Alternativa 3 con separación por sensores de inducción y válvulas de soplado. **Fuente.** Elaboración propia.

La ventaja de esta alternativa es que los materiales de salida tienen un mayor valor agregado, por lo que se pueden vender a mayor precio, pues a partir de su aplicación, como ejemplo, es posible obtener Aluminio (Al) con una pureza cercana al 95 %. En varios contenedores se pueden recolectar, según el armado del aparato separador, diferentes tipos de metal.

CAPÍTULO 8.

ASPECTOS

ECONÓMICOS

CAPÍTULO 8. ASPECTOS ECONÓMICOS.

8.1. ESTIMACIÓN DE INGRESOS.

Se partirá de una situación hipotética para establecer posibles ingresos y costes de un sistema de gestión de residuos eléctricos y electrónicos, RAEE. Refiere Permanyer (2013) que un sistema de gestión de RAEE se fundamenta de manera general en el cumplimiento de las siguientes etapas: recolección y acopio, desmontaje, recuperación y purificación.

Antes del desmontaje, etapa regularmente manual, se realiza un proceso de selección, separando componentes que requieren de un tratamiento posterior especial de aquellos que serán tratados y recuperados de forma corriente en etapas siguientes. En la fase de recuperación, tras la disminución de los desechos por procesos mecánicos, trituración, se hará el proceso de separación atendiendo a las características físicas (peso, tamaño, densidad, propiedades magnéticas y eléctricas, etc.). Luego, los resultados de la separación, residuos, podrán ser llevados a plantas específicas de recuperación, purificación y tratamiento, como los metales férricos y no férricos y los metales preciosos.

El desmontaje de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, RAEE, depende de factores como el contenido de elementos peligrosos en sus componentes, valor de mercado para reutilización y las opciones de reciclaje y reutilización disponibles en el área (Permanyer, 2013). Para establecer una referencia en cuanto a los procesos de funcionamiento se utilizará la experiencia del centro de gestión de RAEE de *El Pont de Vilomara i Rocafort*, en el Bages, Catalunya (Ver Gráfico 7).

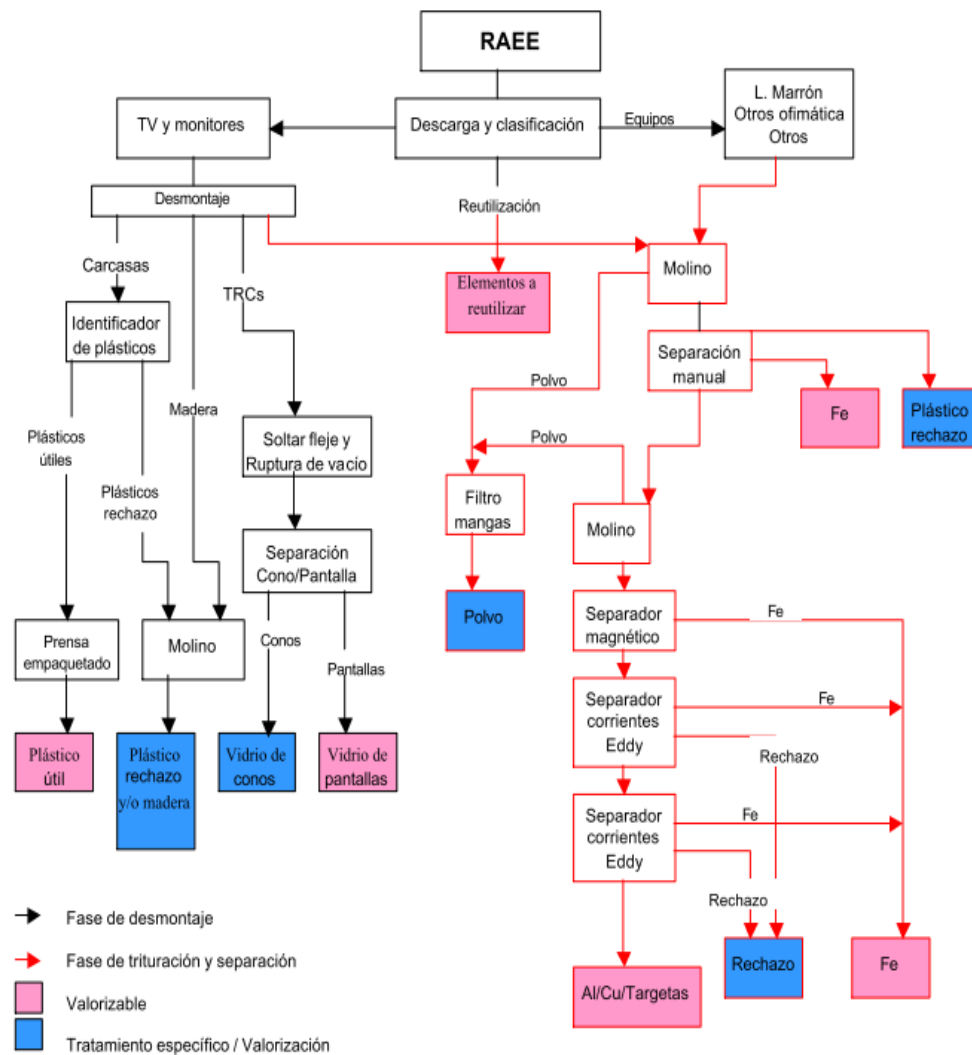


Gráfico 8.1. Procesos de funcionamiento de un centro de gestión de RAEE.
Fuente: Permanyer, 2013.

Castellanos, Llanes y García (2005) expone que los residuos eléctricos y electrónicos, generalmente se componen en proporción de 30 % plásticos, 40 % óxidos refractarios (cerámicos) y 30 % metales. Martínez, Cuevas y Osuna (2019) indican que de una tonelada de RAEE se pueden obtener metales preciados en las proporciones mostradas en la tabla 4.

Tabla 8.1. Volúmenes posibles de metales recuperables por Ton. de RAEE.
Fuente: Martínez, Cuevas y Osuna, 2019.

Metales preciosos	
Oro	400 gr.
Plata	700 gr.
Platino	300 gr.
Paladio	17 gr.
Metales básicos	
Hierro	80 Kg.
Cobre	120 Kg.
Níquel	9 Kg.
Bronce	3,5 Kg.
Estaño	8 Kg.
Aluminio	4 Kg.
Zinc	2,5 Kg.

Pero no solamente se pueden conseguir de los RAEE los metales antes mencionados, sino que también se pueden conseguir los denominados metales pesados, metales que tienen un alto impacto contaminante y son conceptuados muy peligrosos, como: Arsenio, Cadmio, Mercurio, Cromo, Plomo y Selenio. De acuerdo con datos Extraídos de los portales de Index Mundi (2019) y London Metal Exchange (2020), LME, los precios internacionales de los metales mostrados en la tabla anterior alcanzan cotizaciones en la LME de Londres y otras casas de bolsas de intercambio comercial internacional de metales, como las mostradas seguidamente.

Tabla 8.2. Precios de referencia de metales. (Por Ton. y Kg.). **Fuente.** Indexmundi, 2019.

Metal	Precio/Ton. (€)	Precio/Kg. (€)
Oro	50.150.800	50.150,80
Plata	580.000	580,00
Platino	32.664.000	32.664,00
Paladio	76.131.000	76.131,00
Hierro	264	0,26
Cobre	5.657	5,66
Níquel	13.721	13,72
Bronce	6.800	6,80
Estaño	15.960	15,96
Aluminio	1.605	1,61
Zinc	2.192	2,19

Desde la perspectiva de estas dos variables, precios y volumen de recuperación de metales de RAEE, el ingreso por tonelada de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos puede alcanzar para una planta de gestión de RAEE montos bastantes interesantes, tal como se aprecia en la Tabla 6.

Tabla 8.3. Estimación de posibles ingresos por recuperación de metales en una tonelada de RAEE. (En €). **Fuente.** Elaboración propia.

Metal	Volumen	Precio/Kg. (€)	Total (€)
Oro	400 gr.	50.150,80	20.060,32
Plata	700 gr.	580,00	406,00
Platino	300 gr.	32.664,00	9.799,20
Paladio	17 gr.	76.131,00	1.294,23
Hierro	80 Kg.	0,26	20,80
Cobre	120 Kg.	5,66	679,20
Níquel	9 Kg.	13,72	123,48
Bronce	3,5 Kg.	6,80	23,80
Estaño	8 Kg.	15,96	127,68
Aluminio	4 Kg.	1,61	6,44
Zinc	2,5 Kg.	2,19	5,48
Total			32.546,62

Con la suma de los ingresos estimados por venta del plástico y de los elementos cerámicos de los RAEE adicionados a los ingresos por recuperación y venta de los metales presentes en estos aparatos y equipos, se pueden obtener ingresos superiores a 30.000 euros por tonelada de desechos. Además, se puede concertar con las autoridades locales para prestar el servicio de recogida de este tipo de residuos, fijando una tarifa que puede ser por la vía de gestión de recogida selectiva en puntos limpios, tarifa que, por ejemplo, en el Reino Unido se ha establecido en 150 euros por tonelada, lo cual incide en la suma de ingresos de la actividad económica.

8.2. ESTIMACIÓN DE COSTES.

Para la estimación de costes en la gestión de RAEE se considerarán los costes de transporte de recogida y traslado a la planta de separación, selección y desmontaje y a la planta de recuperación, purificación y tratamiento, costes de infraestructura y servicios, costes de recurso humano y costes de contratación de servicio de procesamiento de los metales férricos y no férricos, incluidos los metales preciosos.

8.2.1. Costes de Recogida y Transporte

Según documento de la Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje (s. f.), ACRR, editado por Jean-Pierre Hannequart, los factores de mayor peso en la recolección de los RAEE son: el nivel de servicios (recogida o entrega); el tipo de producto (si amerita contenedores, transporte para traslado según peso y manipulación especial para aparatos con clorofluorocarbono, CFC); zona a la que se le presta el servicio de recolección y las distancias; y las infraestructuras existentes. En el portal de formación y gestión logística LogisDidáctica (2017), se indican los precios del transporte de bienes y servicios en España por volumen y distancia.

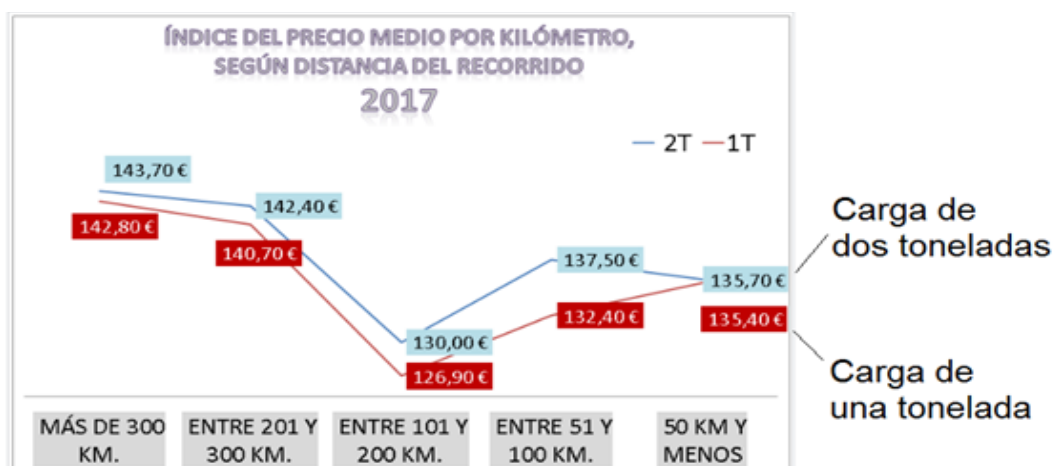


Gráfico 8.2. Índice del precio promedio por kilómetro. **Fuente:** LogisDidactica, 2017.

Como puede apreciarse en el gráfico los costes son muy manejables, pues hasta 2 toneladas en un radio de menos de 50 kilómetros, distancias para las operaciones de recolección y transporte a la planta de procesamiento de metales en el marco del proyecto, tienen un coste de 135,70 euros. Manejando volúmenes de máximo 10 toneladas/día el coste será menor a 1.000 euros/día.

8.2.2. Coste de infraestructura y servicios

El coste por concepto de alquiler de una nave industrial de 2.000 m² es de 2.000 euros al mes. El coste de los servicios de funcionamiento asociados a las actividades operativas alcanza un monto de 1.500 euros/mes. En suma los costes mensuales por concepto de infraestructura y servicios comprenden un monto de 3.500 euros mensuales.

8.2.3. Recurso humano

Con una plantilla de 20 empleados se puede perfectamente gestionar un proyecto de esta magnitud. Con un salario promedio para jornadas completas igual a 1.050 euros mensuales, el coste total de la nómina mensual podría estar alcanzando un monto de 21.000 euros.

8.2.4. Costes de contratación de servicios de recuperación, purificación y tratamiento de los metales férricos y no férricos

El coste de la contratación del servicio de recuperación, purificación y tratamiento de los metales, férricos y no férricos, se puede contratar por un monto de 1.500 euros la tonelada de material a procesar. Ya se explicó que el coste del transporte para trasladar los residuos hasta la planta de procesamiento no alcanzaría los 1.000 euros diarios por traslado de hasta 10 toneladas. Es de acotar que los costes por activos de capital, molinos y tamices, son inversiones de amortización a mediano y largo plazo.

CAPÍTULO 9.

CONCLUSIONES.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES.

La realización del presente trabajo deja un conjunto de conclusiones relacionadas con los resultados de la investigación sobre el crecimiento desmedido de los residuos o desechos sólidos urbanos y los efectos que este problema tiene sobre el medio ambiente y la calidad de vida de los ciudadanos, así como la búsqueda de soluciones a tan grave problemática a nivel mundial, entre las cuales se maneja la minería urbana. De las conclusiones más relevantes, pueden señalarse:

- La producción de residuos sólidos urbanos es un problema creciente en el mundo entero, debido entre otras causas al consumo descontrolado de bienes y servicios, con la adquisición, uso y desecho de aparatos cuya vida útil es cada vez de más corta duración. Esto ha obligado a los gobiernos a tratar de buscar soluciones concertadas, enfocando esfuerzos en el establecimiento de sistemas de gestión que puedan dar respuesta efectiva y eficiente al problema y tomando como base tanto el aspecto medioambiental como el económico. En ese sentido el modelo de economía circular, desde sus principios de economía sostenible en contraposición a los modelos convencionales de economía lineal, se convierte en una poderosa herramienta de apoyo para una solución sustentable.

- El modelo de economía circular como alternativa preconiza en su paradigma el principio de ejecución de estrategias diversas de sostenibilidad en toda la cadena de producción y en el uso de productos y servicios con efectos de mejoras reales en la economía y la sociedad, sustentado en las bases del desarrollo sostenible: preservación y mejora del capital natural, optimización en el uso de los recursos y promoción de la eficacia del sistema detectando las externalidades negativas y suprimiéndolas (Kowszyk y Maher, 2019).

A las formas de actuación de los modelos económicos convencionales (extraer, fabricar, vender, usar y tirar), la economía circular ofrece la posibilidad de repensar los ciclos del hecho económico con su propuesta de: extraer, tomar

los recursos del entorno con criterios medioambientales de mínimo impacto negativo; transformar, con uso de eco-innovaciones para un producto sostenible; distribuir, entrega del producto con mínimo impacto sobre el entorno natural; usar, con reducción de la energía asociada a su utilización y mejora de su rendimiento con la promoción de la reutilización o reciclaje; y recuperar, bien sea como recurso apto para la devolución a la biósfera o medio técnico para reutilización en procesos industriales.

- Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos requieren un tratamiento especial por cuanto en su fabricación se emplean gran cantidad de metales y minerales, muchos de los cuales son potencialmente dañinos a la salud de las personas y al medio ambiente, caso de metales pesados como Cadmio, Cromo, Selenio y Mercurio. También se da el caso que en sus partes componentes contienen otros metales de uso en la industria y que tienden a escasear en la naturaleza, caso de Oro y Platino, metales preciosos, Cobre, Aluminio y Estaño, metales básicos, que pueden ser recuperables y usados nuevamente como materia prima en la elaboración de nuevos productos.

- La minería urbana es una actividad productiva que puede ser técnicamente sustentable y económicamente viable en la recuperación de minerales y metales contenidos en los residuos sólidos urbanos, sobre todo provenientes de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Los beneficios de su acción pueden determinarse en dos vertientes: una de apoyo al mejoramiento del medio ambiente al retirar de la naturaleza metales altamente contaminantes y potencialmente peligrosos, y otra de rendimiento económico, al recuperar y entregar a la industria otros minerales y metales cuya producción extractiva tiende a la escasez.

CAPÍTULO 10.
REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, S. (2015). *Valorización de cenizas volantes y cenizas de fondo procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos: revisión bibliográfica*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje, ACRR. (s. f.). *La gestión de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos. Guía dirigida a autoridades locales y regionales*. Bruselas: Jean-Pierre Hannequart.
- Beke, B. (1964). *Principles of Comminution*. Madison: Universidad de Wisconsin.
- Brizuela, E. y Romano, S. (2003). *67.30 combustión. 1ra. Parte*. Maracay: UBA.
- Calderón, J., Alcívar, C. y Acebo, J. (s. f.). *Metales preciosos en residuos electrónicos para su refinación en Ecuador* [En línea]. Tomado de: <http://xn--caribea-9za.eumed.net/wp-content/uploads/refineria.pdf>
- Castellanos, N. Llanes, D. y García L. (2005). *La chatarra electrónica, la contaminación ambiental y su efecto económico*. Trabajo presentado en el XVI Forum de Ciencia y Técnica, La Habana.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2011). *Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias* [En línea]. Tomado de: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/B01FDCCB-AC8E-4089-9699-FA6413FBEE7C/119905/CENIZASVOLANTESDECARBONYCENIZASDEHOGAR.pdf>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2012). *Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos* [En línea]. Tomado de: http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_ESCORIASYCENIZASDEINCINERADORADERESIDUOSSOLIDOSURBANOSDIC2012.pdf
- Cerdá, E. y Khalilova, A. (2016). *Economía circular* [En línea]. Tomado de: <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/Economia>

Industrial/RevistaEconomiaindustrial/401/CERD%C3%81%20y%20KHALILO
VA.pdf

Chiralde, M. (2019). *Una mina en el bolsillo* [En línea]. Tomado de:
<https://medium.com/juventud-t%C3%A9cnica/una-mina-en-el-bolsillo-3d5588d9150>

Comisión Europea. (18 de diciembre de 2014). *Decisión de la Comisión por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo*. Diario Oficial de la Unión Europea L 370, de 30 de diciembre de 2014.

Comisión Europea. (2 de diciembre de 2015). *Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular*. COM(2015) 614 final.

Conner, J. y Hoffner, S. (1998). Critical review of stabilisation/solidification technology. *Critical Review in Environmental Science and Technology*. Volumen 28, num, 4. pp. 397-462.

Cortés, E. (2012). *Metales y producción* [En línea]. Tomado de:
<https://sites.google.com/site/edgarctts/metales-y-produccion-1>

Cruz, S. y Ojeda, S. (2013). Gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 29, num. 3. pp. 7-8-

Delauney, N. y Montero, R. (2013). *Eficiencia energética asociada al reciclaje de metales*. Primer Congreso Internacional y Expo Científica Investigación Sostenible, Energías Renovables y Eficiencia Energética. Quito, Ecuador.

Ecoembes. (2018). *Presentación de resultados 2017*. Madrid: Ecoembes.

Fernández, G. (2013). *Minería urbana y la gestión de los residuos electrónicos*. Buenos Aires: Ediciones Isalud.

Fernández, R. (2018). Ranking de los principales países productores de residuos electrónicos en el mundo en 2016, según volumen de producción (en millones de toneladas métricas) [En línea]. Tomado de:
<https://es.statista.com/estadisticas/576162/principales-productores-de-basura-tecnologica-en-el-mundo/>

García, R. (2018). *Tratamiento de escorias de una incineradora de residuos domésticos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

- Global Electricity. (2013). *Centrales incineradoras de residuos sólidos urbanos* [En línea]. Tomado de: <https://globalelectricity.wordpress.com/2013/10/07/92/>
- Gómez, J. (2018). *Minería urbana: recuperación de metales y elementos estratégicos de ciclos urbanos*. (Trabajo de Fin de Grado). Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, España.
- Hidalgo, L. (2010). *La basura electrónica y la contaminación ambiental*. Quito: Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Tecnológica Equinoccial.
- <https://www.indexmundi.com/es/>
- <https://www.lme.com/>
- Iriani, M., Puig, I. y Sastre, S. (2018). *Las tasas de residuo en España. 2018*. Barcelona: Fundació ENT.
- Kang, H.-Y., Schoenung, J. (2005). Reciclaje electrónico de desechos: una revisión de la infraestructura y las opciones tecnológicas de EE. *Recursos, Conservación y Reciclaje*. Volumen 45, Nº 4. pp. 368-400.
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Manage*. Nº 57. pp. 64-90.
- Kowszyk, Y. y Maher, R. (2019). *Estudio de casos sobre modelo de economía circular e integración de los objetivos de desarrollo en estrategias empresariales en la UE y ALC*. Hamburgo: Eula Foundation.
- Langa, A. (2018). *Valorización energética de los residuos sólidos urbanos para el impulso de la economía circular en Cantabria*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Li, J. (2015). Wastes could be resources and cities could be mines. *Waste Management & Research*. Volumen 33, Nº 4. pp. 301-302.
- Liwanag, L. (2016). *Impactos de los residuos electrónicos en la persona* [En línea]. Tomado de: https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2016/06/HR_EWaste_SPA.pdf

- LogisDidactica. (2017). *Índice de precios de mercancías por carretera* [En línea]. Tomado de: <http://logisdidactica.es/indice-de-precios-del-transporte-de-mercancias-por-carretera/>
- Luna-Galiano, Y. (2013). *Estudio de la estabilización/solidificación de residuos industriales mediante la tecnología de geopolímeros basados en cenizas volantes procedentes de centrales térmicas*. (Tesis de Doctorado). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Martínez, A., Cuevas, D. y Osuna, J. (2019). Gestión de desechos electrónicos en la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Mazatlán. *RITI Journal*. Vol. 7, num. 13. Enero – junio. pp. 53-60.
- Menéndez, E., Álvaro, A., Argiz, C., Parra, J. y Moragues, A. (2013). Characterization of bottom ashes from coal pulverized power plants to determine their potential use feasibility. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Volumen 52, Nº 6. Noviembre-diciembre. pp. 296-304.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR) 2016-2022* [En línea]. Tomado de: https://www.aprr.eus/wp-content/uploads/2016/11/20151106PEMAR-2016_2022_apartado-13_pag96.pdf
- Ministerio de medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. Documento BREF*. Madrid: Centro de Publicaciones.
- Ministerio de la Presidencia. (1 de febrero de 2018). *REAL DECRETO 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos*. Madrid: Boletín Oficial del Estado, BOE, Nº 37. 12 de febrero de 2008.
- Ministerio de la Presidencia. (12 de junio de 2009). *Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades*

- mineras*. Madrid: Boletín Oficial del Estado, BOE, Nº 143. 13 de junio de 2009.
- Ministerio de Medio Ambiente. (8 de febrero de 2002). *ORDEN MAM/304/2002 por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos*. Madrid: Boletín Oficial del Estado, BOE, Nº 43. 15 de febrero de 2002.
- Nieto, A., Guijarro, C., Atanes, E. y Fernández, F. (2015). Un método mixto de separación e inmovilización para la eliminación de sales solubles y la estabilización de metales pesados en incineración de residuos sólidos municipales. *Revista de Gestión Ambiental*. Volumen 240. 15 de junio de 2019. pp. 359-367.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU. (16 de diciembre de 1966). *Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales*. Resolución 2200 A (XXI). 3 de enero de 1976.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU. (16 de diciembre de 1966). *Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos*. Resolución 2200 A (XXI). 23 de marzo de 1976.
- Osorio, A., Restrepo, G. y Marín, J. (2013). *Operaciones de reducción de tamaño: trituración primaria y secundaria*. Departamento de Ingeniería Química - Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. 1-5 pp.
- Palma, L., Reyes, A., Vásquez, F., Lira, M. y González, M. (2016). Los residuos electrónicos un problema mundial del siglo XXI. *CULCyT*. Año 13. Nº 59, Especial Nº 1. Mayo-agosto. pp. 379-392.
- Paluš, H., Parobek, J., Šulek, R., Lichý J. y Šálka, J. (2018). Understanding Sustainable Forest Management Certification in Slovakia: Forest Owners' Perception of Expectations, Benefits and Problems. *Sustainability*. Vol. 10. Nº 2470. pp. 1-17.
- Parlamento Europeo y del Consejo. (15 de marzo de 2006). *Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la gestión de*

los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE. Diario Oficial de la Unión Europea L 102.

Parlamento Europeo y del Consejo. (19 de noviembre de 2008). *Directiva 2008/98/CE sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (Texto pertinente a efectos del EEE).* Diario Oficial de la Unión Europea L 312 de 22 de noviembre de 2012.

Parlamento Europeo y del Consejo. (20 de mayo de 2018). *Directiva 2018/851 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos (Texto pertinente a efectos del EEE).* Diario Oficial de la Unión Europea L 150/109 de 14 de junio de 2018.

Pavez, O. (2005). *Apuntes concentración de minerales II* [En línea]. Tomado de:

https://www.academia.edu/8000760/UNIVERSIDAD_DE_ATACAMA_FACULTAD_DE_INGENIERIA_DEPARTAMENTO_DE_METALURGIA_APUNTES_CONCENTRACION_DE_MINERALES_II

Permanyer, O. (2013). *Situación e impacto de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Caso de estudio: los ordenadores.* (Master de Sostenibilidad). Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, España.

Prieto, V., Jaca, C. y Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*. Nº 15. pp. 85-95.

Ramírez, E. (2019). *UF0345: Apoyo administrativo a la gestión de recursos humanos.* Málaga: Editorial Elearning, S.L.

Regulación de Motores, S.A. (s. f.). *Separación de metales* [En línea]. Tomado de:

https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf

Rodríguez, J., e Irabien, A. (1999). *Los residuos peligrosos. Caracterización, tratamiento y gestión.* Madrid: Editorial Síntesis.

- Redacción. (8 de julio de 2019). "Crisis mundial de la basura": 3 cifras impactantes sobre el rol de Estados Unidos [En línea]. BBC News Mundo. Tomado de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48914734>
- Robles-Arangiz, M. (2006). *Consecuencias de la incineración y alternativas*. Bilbao: Medio Ambiente ELA.
- Sáez, A. y Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*. Año 20, Nº 3. pp. 121-135.
- Sánchez, J., Betancur, J. y Ocampo, L. (2016). Conminución y análisis granulométrico para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías de teléfonos móviles. *Gestión y ambiente*. Volumen 19, Nº 2. pp. 240-251.
- Saveyn, H., Eder, P., Ramsay, M., Thonier, G., Warren, K. y Hestin, M. (2016). *Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy*. Sevilla: European Commission.
- Spence, R. y Shi, C. (2005). *Stabilisation and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes*. Boca Raton: CRC Press.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., De Vries, W., De Wit, C., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G., Persson, L., Ramanathan, V., Reyers, B. y Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*. Vol. 347. pp. 1-10.
- Terry, B. (1995). *Principios de fundición*. Barcelona: Gustavo Gili Editorial, S.A.
- Vega, J. (s. f.). *Conminución de minerales* [En línea]. Tomado de: https://www.academia.edu/36722321/Conminuci%C3%B3n_de_minerales
- Xu, X., Yang, H., Chen, A., Zhou, Y., Wu, K., Liu, J. y Huo, X. (2012). Birth outcomes related to informal e-waste recycling in Guiyu, China. *Reproductive Toxicology*. Volumen 33, num. 1. pp. 94-98